

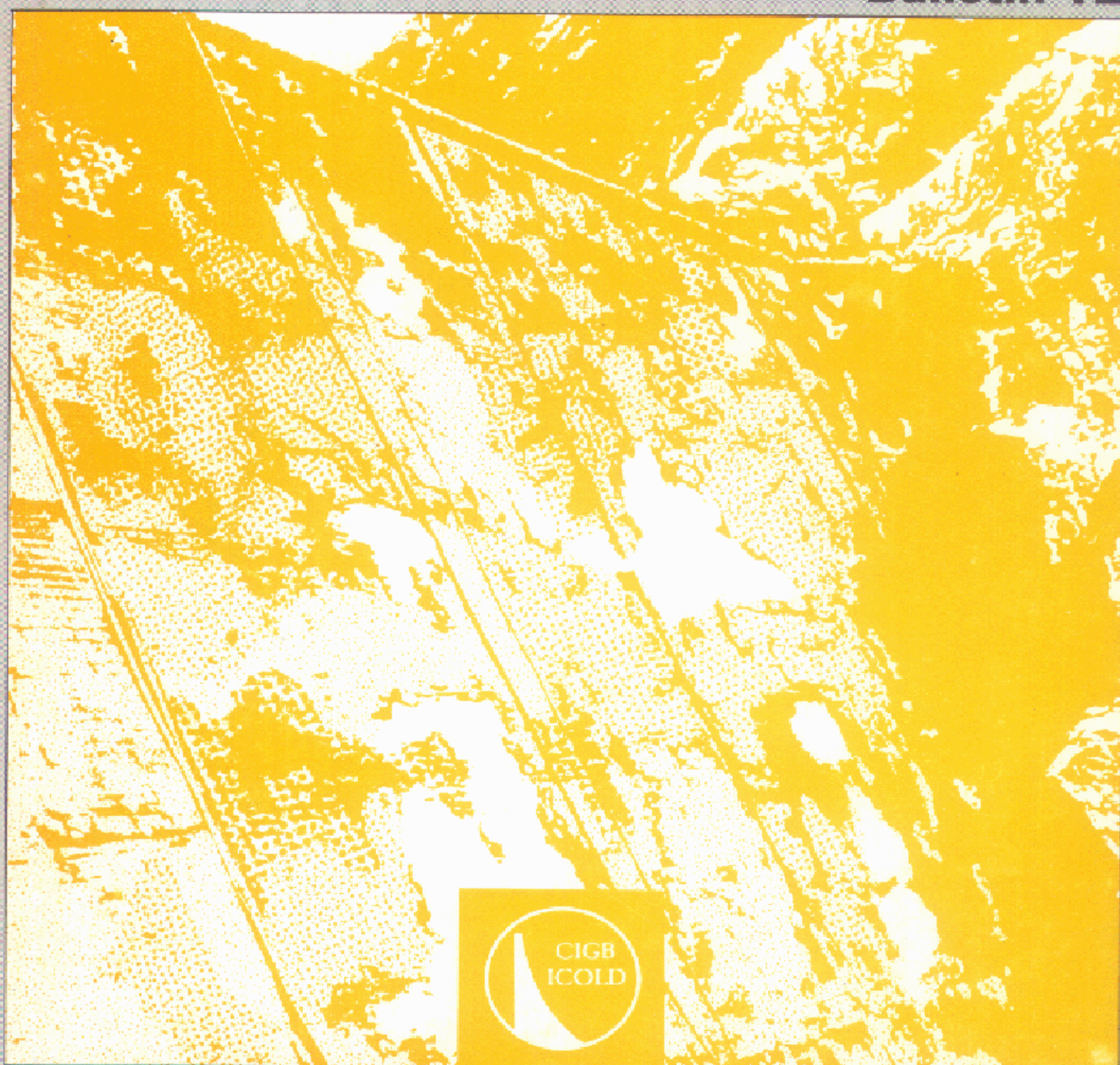
EXPOSURE OF DAM CONCRETE TO SPECIAL AGGRESSIVE WATERS.

Guidelines.

BÉTON DE BARRAGE EXPOSÉ AUX EAUX AGRESSIVES.

Recommandations.

Bulletin 71



1989

This Bulletin has been prepared by P. J. Mason (Great Britain)
on behalf of the British National Committee on Large Dams
for the Committee on Materials for Concrete Dams
Original text in English - French translation
by R. Chadwick, revised by Y. Le May

*Ce Bulletin a été préparé par P. J. Mason (Grande-Bretagne)
au nom du Comité Britannique des Grands Barrages
pour le Comité des Matériaux pour Barrages en Béton
Texte original en anglais - Traduction en français
par R. Chadwick, revue par Y. Le May*

EXPOSURE OF DAM CONCRETE TO SPECIAL AGGRESSIVE WATERS.

Guidelines.

BÉTON DE BARRAGE EXPOSÉ AUX EAUX AGRESSIVES.

Recommandations.

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

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON MATERIALS FOR CONCRETE DAMS
COMITÉ DES MATÉRIAUX POUR BARRAGES EN BÉTON (*)
(1983-1989)

Chairman/Président Italy/Italie	P. BERTACCHI
Members/Membres Brazil/Brésil	W. PACELLI DE ANDRADE
France/France	J.-P. GARBE
Great Britain/Grande-Bretagne	M. W. C. WILLIAMS
Iran/Iran	J. TABATABAI
Japan/Japon	T. YANAGIDA
Mexico/Mexique	C. GOMEZ-TOLEDO
Norway/Norvège	I. BOERSETH
Portugal/Portugal	E. F. PIMENTEL MACHADO
South Africa/Afrique du Sud	P. A. C. HALLIER
Sweden/Suède	A. ENGELBREKTSON
Switzerland/Suisse	G. TRUCCO
USA/États-Unis	J. R. GRAHAM
USSR/URSS	A. D. OSIPOV
Yugoslavia/Yougoslavie	M. CALOGOVIC

(*) Membership in March 1989
Composition en mars 1989

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. TYPES D'AGRESSION
3. ZONES A RISQUE ÉLEVÉ
4. ANALYSES DE L'EAU
5. EFFETS NUISIBLES
6. MESURES PRÉVENTIVES
7. ENQUÊTES SUR DES BARRAGES EXISTANTS
8. TRAVAUX DE RÉPARATION
9. RÉFÉRENCES

ANNEXE A - Exemples

ANNEXE B - Codes et normes

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. TYPES OF ATTACK
3. PLACES OF HIGH RISK
4. WATER ANALYSES
5. DELETERIOUS EFFECTS
6. PREVENTIVE MEASURES
7. INVESTIGATIONS AT EXISTING DAMS
8. REMEDIAL WORKS
9. REFERENCES

APPENDIX A - Case histories

APPENDIX B - Codes and standards

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	12
1. INTRODUCTION	14
1.1. Objet du Bulletin	14
1.2. Étendue et nature du problème	14
1.3. Objet du Bulletin	14
2. TYPES D'AGRESSION	16
2.1. Eau douce	16
2.2. Sulfates	18
2.3. Sulfures	20
2.4. Chlorures	20
2.5. Acides	22
2.6. Végétation	24
2.7. Agressions combinées	24
3. ZONES A RISQUE ÉLEVÉ	28
3.1. Généralités	28
3.2. Zones géographiques	28
3.2.1. Eau de montagne ou des plateaux marécageux	28
3.2.2. Eau des basses terres marécageuses ou des marais	28
3.2.3. Sous-sol igné ou siliceux	28
3.2.4. Zones naturellement riches en sulfates	30
3.2.5. Zones naturellement riches en sulfures	30
3.2.6. Sol pollué et déchets	30
3.2.7. Eau de mer	32
3.2.8. Dépôts d'origine marine	32
3.3. Zones dans les ouvrages	32
3.3.1. Chemins potentiels d'écoulement	32
3.3.2. Zones avec armatures ou autres aciers noyés	34
3.3.3. Routes	36
3.3.4. Galeries non ventilées	36
3.3.5. Puisards et drains de décompression	36
3.3.6. Végétation	38
4. ANALYSES DE L'EAU	42
4.1. Critères de base - Définitions	42
4.1.1. Teneur en ions	42
4.1.2. pH	42
4.1.3. Alcalinité ou acidité	44
4.1.4. Dureté	44
4.1.5. Anhydride carbonique dissous	44
4.1.6. Teneur totale en matières solides dissoutes	46
4.1.7. Indice de saturation	46
4.1.8. Température	46
4.1.9. Conductivité électrique	46

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	13
1. INTRODUCTION	15
1.1. Scope of the Bulletin	15
1.2. Extent and Nature of the Problem	15
1.3. Purpose of the Bulletin	15
2. TYPES OF ATTACK	17
2.1. Soft Water	17
2.2. Sulphates	19
2.3. Sulphides	21
2.4. Chlorides	21
2.5. Acids	23
2.6. Plant Growth	25
2.7. Combined Attacks	25
3. PLACES OF HIGH RISK	29
3.1. General	29
3.2. Geographical Location	29
3.2.1. Mountain or High Moorland Water	29
3.2.2. Low Moorland or Marsh Water	29
3.2.3. Igneous and Siliceous Geology	29
3.2.4. Natural Sulphate Rich Areas	31
3.2.5. Natural Sulphide Rich Areas	31
3.2.6. Contaminated Ground and Waste Products	31
3.2.7. Seawater	33
3.2.8. Deposits of Marine Origin	33
3.3. Structural Locations	33
3.3.1. Potential Flow Paths	33
3.3.2. Areas with Reinforcement or Embedded Parts	35
3.3.3. Highways	37
3.3.4. Unventilated Galleries	37
3.3.5. Pump Sumps and Relief Drains	37
3.3.6. Plant Growth	39
4. WATER ANALYSES	43
4.1. Basic Requirements and Definitions	43
4.1.1. Ion Content	43
4.1.2. pH	43
4.1.3. Alkalinity or Acidity	45
4.1.4. Hardness	45
4.1.5. Dissolved Carbon Dioxide	45
4.1.6. Total Dissolved Solids	47
4.1.7. Saturation Index	47
4.1.8. Temperature	47
4.1.9. Electrical Conductivity	47

4.2. Évaluation de l'agressivité due au lessivage par l'eau douce	46
4.2.1. Anhydride carbonique dissous	46
4.2.2. Essai simple	48
4.2.3. Indice de saturation ou indice Langelier	48
4.3. Sulfates	50
4.4. Technique de prise d'échantillons	50
4.5. Classification des niveaux d'agressivité	52
5. EFFETS NUISIBLES	72
5.1. Perte de résistance mécanique	72
5.2. Augmentation des débits de drainage	72
5.3. Augmentation de la sous-pression	72
5.4. Réduction de la cohésion	74
5.5. Corrosion des armatures	74
5.6. Effets hydrauliques	74
5.7. Esthétique	76
5.8. Poches de gaz	76
6. MESURES PRÉVENTIVES	78
6.1. Introduction	78
6.2. Définition de la composition du béton	78
6.2.1. Granulats	78
6.2.2. Ciments	78
6.2.3. Rapport eau/ciment	82
6.2.4. Adjuvants	84
6.2.5. Cure	84
6.3. Projet et études de détail	84
6.4. Surveillance du chantier	86
6.5. Écrans et revêtements	88
6.6. Traitement de l'eau	90
6.7. Utilisation des terres	90
6.8. Eau de mer	92
6.9. Appareils de mesure et auscultation	92
7. ENQUÊTES SUR DES BARRAGES EXISTANTS	98
7.1. Introduction	98
7.2. Examen visuel	98
7.3. Analyse des relevés	98
7.4. Essais de coloration	98
7.5. Analyse de l'eau	98
7.6. Prélèvement de carottes	100
7.7. Forages par percussion	100
7.8. Mesures aux ultrasons	102
7.9. Mesures au scléromètre Schmidt	102
7.10. Essais de perméabilité <i>in situ</i>	104
7.11. Relevés géologiques	104
7.12. Détection de gaz	104

4.2. Assessing Aggressivity due to Soft Water Leaching	47
4.2.1. Dissolved Carbon Dioxide	47
4.2.2. Simple Testing	49
4.2.3. Saturation or Langelier Index	49
4.3. Sulphates	51
4.4. Sampling Technique	51
4.5. Aggression Level Classification	53
5. DELETERIOUS EFFECTS	73
5.1. Loss of Strength	73
5.2. Increased Drainage Flows	73
5.3. Increased Uplift	73
5.4. Reduced Cohesion	75
5.5. Corrosion of Reinforcement	75
5.6. Hydraulic Effects	75
5.7. Appearance	77
5.8. Gas Pockets	77
6. PREVENTIVE MEASURES	79
6.1. Introduction	79
6.2. Concrete Mix Design	79
6.2.1. Aggregate	79
6.2.2. Cements	79
6.2.3. Water/Cement Ratio	83
6.2.4. Admixtures	85
6.2.5. Curing	85
6.3. Design and Detailing	85
6.4. Site Control	87
6.5. Barriers and Facings	89
6.6. Water Treatment	91
6.7. Land Use	91
6.8. Seawater	93
6.9. Instrumentation and Monitoring	93
7. INVESTIGATIONS AT EXISTING DAMS	99
7.1. Introduction	99
7.2. Visual Inspection	99
7.3. Examination of Records	99
7.4. Dye	99
7.5. Water Analysis	99
7.6. Core Drilling	101
7.7. Percussion Drilling	101
7.8. Ultrasonic Testing	103
7.9. Schmidt Hammer Testing	103
7.10. <i>In situ</i> Permeability Tests	105
7.11. Geological Mapping	105
7.12. Gas Detection	105

8. TRAVAUX DE RÉPARATION	108
8.1. Généralités	108
8.2. Rétablissement de l'étanchéité	108
8.2.1. Enduits étanches	108
8.2.2. Masques étré sillonnés	110
8.2.3. Masques en béton ancrés	110
8.2.4. Joints et fissures	112
8.2.5. Injections	112
8.2.6. Réparations sous l'eau des parements	114
8.3. Stabilité	114
8.4. Attaque par les acides en galeries	116
8.5. Colmatage des pompes de drainage	116
8.6. Appareils de mesure et auscultation	116
9. RÉFÉRENCES	132
ANNEXE A	
Exemples	135
ANNEXE B	
Codes et normes	175

8. REMEDIAL WORKS	109
8.1. General	109
8.2. Waterproofing	109
8.2.1. Barrier Coatings	109
8.2.2. Braced Facing Walls	111
8.2.3. Anchored Concrete Facing Walls	111
8.2.4. Joints and Fissures	113
8.2.5. Grouting	113
8.2.6. Underwater Face Repairs	115
8.3. Stability	115
8.4. Acid Attack in Galleries	117
8.5. Scaling up of Drainage Pumps	117
8.6. Instrumentation and Monitoring	117
9. REFERENCES	132
APPENDIX A	
Case histories	135
APPENDIX B	
Additional codes and standards	175

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig. 1. — Lessivage à différentes distances d'une fissure avec fuites, déterminé par analyse chimique du béton.
- Fig. 2. — Fuites et lessivage dans un joint de construction. Influence des variations saisonnières de température et d'ouverture du joint en résultant.
- Fig. 3. — Influence du rapport eau/ciment sur la perméabilité du ciment durci.
- Fig. 4. — Influence du rapport eau/ciment sur la corrosion des armatures (diamètre 20 mm).
- Fig. 5. — Influence du rapport recouvrement/diamètre des armatures sur la surface atteinte par la corrosion ($E/C = 0,55$).
- Fig. 6. — Barrages Écossais - Rapport des valeurs sclérométriques Schmidt entre la base et la crête du barrage, en fonction de l'âge de l'ouvrage.
- Fig. 7. — Masque étré sillonné du barrage de Ringedal (Norvège).
- Fig. 8. — Réparation des parements et injection au barrage-voûte de Maentwrog (Pays de Galles).
- Fig. 9. — Réparation du barrage de Trawsfynydd (Pays de Galles), au moyen d'un nouveau parement amont et d'un remblai de butée aval.
- Fig. 10. — Réparation du barrage d'Arno (Italie) au moyen d'un nouveau parement amont.
- Fig. 11. — Réparation du barrage de Salarno (Italie) au moyen d'un nouveau parement amont.
- Fig. 12. — Rénovation des étanchéités amont des joints de retrait des barrages de Guerlédan (France) et de Caraser (Italie).
- Fig. 13. — Détails de l'étanchement des fissures aux barrages de la Bromme, de la Girotte et du Gage (France).
- Fig. 14. — Injections internes au barrage-poids de Garichte (Suisse).
- Fig. 15. — Réparation du barrage Delta (USA) au moyen d'un nouveau parement, d'injections, de tirants et d'un massif de butée aval en béton.
- Fig. 16. — Histogramme du nombre d'exemples par décennie de construction.
- Tableau A. — Résultats d'une analyse ionique type, exprimés en mg/l, e.mg/l et e.CaCO₃ (mg/l).
- Tableau B. — Coefficients de conversion entre mg/l et e.mg/l.
- Tableau C. — Coefficients de conversion des mg/l en e.CaCO₃ (mg/l).
- Tableau D. — Analyses d'échantillons d'eau provenant de la retenue (A) et d'une galerie de drainage (B) d'un grand barrage-voûte.
- Tableau E. — Niveaux d'agressivité selon différentes normes nationales.
- Tableau F. — Niveaux d'agressivité due aux sulfates et qualités requises des ciments (Royaume-Uni).
- Tableau G. — Niveau d'agressivité due aux sulfates et qualités requises des ciments (Etats-Unis - Bureau of Reclamation).
- Tableau H. — Agressivité de solutions et de sols (Norme Française P 18-011, de mai 1985).
- Tableau I. — Définition des classes d'agressivité (Norme Française P 18-011, de mai 1985).
- Tableau J. — Relation entre le type de ciment et les caractéristiques du béton.
- Tableau K. — Durée de cure nécessaire à l'obtention de discontinuités capillaires.
- Tableau L. — Liste des exemples.
-

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1. — Degree of Leaching at Different Distances from a Leaking Crack Determined by Chemical Analysis of Concrete.
- Fig. 2. — Rate of Leaking and Leaching at a Construction Joint, Varying with Annual Temperature and hence Joint Dilation.
- Fig. 3. — Effect of Water/Cement Ratio on Permeability of Mature Cement Paste.
- Fig. 4. — Influence of Water/Cement Ratio on Corrosion of 20 mm Bars.
- Fig. 5. — Influence of Cover to Bar Diameter Ratio on Corroded Area of Reinforcement (W/C = 0.55).
- Fig. 6. — Schmidt Hammer Strength Ratios between the Bases and Crests of Various Scottish Dams as a Function of Age.
- Fig. 7. — Propped Upstream Facing Wall at Ringedal Dam, Norway.
- Fig. 8. — Remedial Facing and Grouting at Maentwrog Arch Dam, Wales.
- Fig. 9. — Remedial Facing and Downstream Embankment Buttressing at Trawsfynydd Dam, Wales.
- Fig. 10. — Remedial Facing at Arno Dam, Italy.
- Fig. 11. — Remedial Facing at Salarno Dam, Italy.
- Fig. 12. — Installation of New Upstream Seals in Contraction Joints at Guerledan Dam, France and Careser Dam, Italy.
- Fig. 13. — Fissure Sealing Details at La Bromme, La Girotte and Le Gage Dams, France.
- Fig. 14. — Internal Grouting of Garichte Gravity Dam, Switzerland.
- Fig. 15. — Remedial Facing, Grouting, Stressing and Thrust Block at Delta Dam, USA.
- Fig. 16. — Histogram of Number of Case Histories by Decade of Construction.
- Table A. — Results of a Typical Ion Analysis Expressed in Terms of mg/l, e.mg/l and e.CaCO₃ (mg/l).
- Table B. — Conversion Factors between mg/l and e.mg/l.
- Table C. — Conversion Factors for mg/l to e.CaCO₃ (mg/l).
- Table D. — Analyses of Water Collected from (A) the Reservoir and (B) a Drainage Gallery at a Major Arch Dam.
- Table E. — Aggression Levels from Various National Codes.
- Table F. — Sulphate Aggression Levels and Cement Requirements, United Kingdom.
- Table G. — Sulphate Aggression Levels and Cement Requirements, United States Bureau of Reclamation.
- Table H. — Aggressiveness of Solutions and Soils (French Standard P 18-011, May 1985).
- Table I. — Definition of Categories of Aggressiveness (French Standard P 18-011, May 1985).
- Table J. — Relationship between Cement Type and Characteristics of Concrete.
- Table K. — Duration of Curing for Capillary Discontinuity.
- Table L. — List of Case Histories.

AVANT-PROPOS

La nature massive des barrages en béton peut cacher le fait qu'ils sont parfois soumis à l'agression et à la détérioration dans certains milieux hostiles. Le problème n'est pas nouveau. En effet, lors du premier Congrès des Grands Barrages à Stockholm, en 1933, la détérioration des barrages-poids fut l'objet de la toute première question. D'autres exemples sont apparus lorsque le sujet plus général de la détérioration des barrages fut abordé, en 1967, au Congrès d'Istanbul.

Lors de la 40^e Réunion Exécutive de Canberra, en 1972, le Comité du Vieillessement des Barrages fut créé. Plus tard, ce Comité prit le nom de « Comité de la Détérioration des Barrages et Réservoirs ». Pendant les années 70, ce Comité effectua une étude approfondie de la détérioration des barrages et des réservoirs, qui aboutit à la publication, en 1983, d'un rapport du même titre. Les résultats de cette étude ont montré que 11 % des exemples de détérioration de barrages en béton provenaient d'agents agressifs extérieurs.

Compte tenu de cette constatation, lorsque la 51^e Réunion Exécutive de la CIGB, tenue à Londres en 1983, fut appelée à débattre des activités futures, un des sujets proposés à l'étude du Comité des Matériaux pour Barrages en Béton fut le problème du béton soumis à des eaux agressives. Un sous-Comité du Comité National Britannique des Grands Barrages (BNCOLD) proposa de charger Dr. P. J. Mason de cette étude. Après remise d'une proposition concernant le programme de l'étude et le questionnaire correspondant, il fut décidé, à la Réunion Exécutive de Lausanne, en 1985, d'entreprendre ce travail.

Le premier projet de rapport, incluant les résultats des réponses au questionnaire, fut approuvé à la 55^e Réunion Exécutive de la CIGB à Beijing, en 1987. Le projet final, incorporant d'autres réponses et commentaires de pays membres, fut préparé par Dr. P. J. Mason et le rapport définitivement approuvé par la 56^e Réunion Exécutive tenue à San Francisco, en 1988.

Le présent Bulletin examine l'étendue du problème de l'attaque du béton de barrage par des eaux agressives et la nature de ces différentes attaques. Il passe ensuite en revue les mesures préventives disponibles, ainsi que les techniques de recherche et les moyens de réparation une fois que l'attaque est constatée.

Le Bulletin s'adresse spécialement à tous ceux intéressés par les barrages en béton, que ce soit dans le domaine du projet ou des travaux d'entretien.

P. Bertacchi
Président du Comité des Matériaux
pour Barrages en Béton

FOREWORD

The massive nature of concrete dams belies the fact that they can be subject to attack and degradation in hostile environments. The matter is not new and indeed when the first International Congress on Large Dams took place in Stockholm in 1933 the deterioration of concrete gravity dams formed the subject of the very first question. Additional case histories became apparent when the subject of dam deterioration in general was addressed at the 1967 International Congress in Istanbul.

At the 40th Executive Meeting of ICOLD in Canberra in 1972 the Committee on Ageing of Dams was established. The name was subsequently changed to the Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs. During the 1970s the Committee carried out an extensive survey into the deterioration of dams and reservoirs, eventually publishing their findings in a volume of that title in 1983. The results of the survey indicated that 11 % of cases of deterioration of concrete dams had involved some form of attack from the environment.

With this as a background, when the Executive Meeting of ICOLD held in London in 1983 considered proposals for future activities, one of the topics suggested for the Committee on Materials for Concrete Dams was the exposure of concrete to special aggressive water. The appropriate sub-committee of the British National Committee (BNCOLD) proposed that Dr. P. J. Mason should carry out the work and, following the submission of a draft list of contents and a questionnaire, the Executive Meeting at Lausanne in 1985 agreed that the work should proceed.

The first draft, incorporating the results of the questionnaire replies, was approved at the 55th Executive Meeting of ICOLD in Beijing in 1987. The final draft, which incorporated further replies and comments from member countries, was prepared by Dr. P. J. Mason following the final approval of the report at the 56th Executive Meeting of ICOLD in San Francisco in 1988.

The Bulletin reviews the extent to which environmental attack on dam concrete has taken place together with the nature of such attacks. It reviews what preventive measures are available against such attacks together with investigative techniques and remedial actions available once attack has occurred.

The Bulletin is particularly intended for people involved in concrete dams, both for maintenance operations and design aspects.

P. Bertacchi
Chairman, Committee on Materials
for Concrete Dams

1. INTRODUCTION

1.1. OBJET DU BULLETIN

Dans cette étude du problème du béton de barrage exposé à des agents agressifs, on se limite à l'action des agents chimiques externes (eau douce, sulfates, acides organiques,...). Les domaines tels que la réaction alcali-granulats ou les attaques physiques (gel, abrasion, cavitation,...) ne sont pas abordés.

1.2. ÉTENDUE ET NATURE DU PROBLÈME

L'étendue de l'action chimique sur le béton des barrages est très variable. Parfois, un parement soumis depuis longtemps à un agent agressif ne présente qu'une rugosité superficielle peu esthétique, qui ne nécessite pas toujours des réparations. Par contre, dans les cas les plus sévères, le corps du barrage en béton est attaqué en profondeur par lessivage, avec formation de chemins privilégiés de percolation, des débits de fuites excessifs, et des sous-pressions qui peuvent compromettre la sécurité de l'ouvrage. Certains barrages ayant souffert de telles détériorations ont dû être renforcés par un massif en terre construit contre le parement aval ou, dans certains cas extrêmes, abandonnés.

1.3. OBJET DU BULLETIN

L'objet du présent Bulletin est d'étudier les types d'attaque par des agents chimiques présents dans l'environnement, qui ont la plus grande probabilité de survenir, et également les zones de forte probabilité de présence de tels agents. On examine les moyens disponibles permettant de constater si le barrage est soumis à une telle attaque (ou risque de l'être dans l'avenir), et les résultats probables de cette attaque dans le cas où des mesures préventives n'ont pas été prises. On passe en revue les mesures préventives appropriées, ainsi que les mesures de protection à mettre en œuvre quand l'attaque est déjà déclenchée.

1. INTRODUCTION

1.1. SCOPE OF THE BULLETIN

In considering the exposure of concrete in dams to aggressive agents, the Bulletin concentrates on attack by external chemical agents, such as soft water, sulphates, organic acids, etc. It does not include alkali-aggregate reactivity nor physical attack by frost, water abrasion, cavitation, etc.

1.2. EXTENT AND NATURE OF THE PROBLEM

The extent of chemical attack on dam concrete from the environment can vary considerably. In some cases, the prolonged exposure of a concrete face to an aggressive agent may simply result in unsightly surface roughness which may or may not require remedial treatment. In the most severe cases the main body of the dam concrete may be attacked by leaching agents, leading to the formation of seepage paths, unacceptable drainage flows and uplift pressures which give cause for structural concern. There have been cases where concrete dams affected in this way have had to be propped by earth embankments constructed immediately downstream or, in extreme cases, abandoned completely.

1.3. PURPOSE OF THE BULLETIN

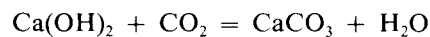
The purpose of the Bulletin is to consider which types of environmental/chemical attack are most likely to affect dam concrete and those areas where the risk of such attack can be reasonably expected to be high. The Bulletin considers the means of identifying whether a problem exists or is likely to exist and considers the probable results of attack where preventive measures have not been taken. It includes reviews of what such preventive measures might be and also what remedial measures might be taken where attack has already occurred.

2. TYPES D'AGRESSION

2.1. EAU DOUCE

L'eau provenant des zones montagneuses est souvent très pure et très peu minéralisée. Son pH est plus ou moins neutre (7 environ), mais elle attaque le béton en dissolvant l'hydrate de calcium du ciment durci. Tous les bétons de ciment Portland courant contiennent plus ou moins d'hydrate de calcium (Ca(OH)_2), résultant de l'hydratation de l'oxyde de calcium (CaO) et des silicates de calcium dans le ciment frais non hydraté. C'est l'hydrate de calcium et les solutions alcalines qui lui sont associées dans les pores du ciment durci qui rendent celui-ci très alcalin, la valeur du pH étant généralement de l'ordre de 12,8 à 13,4 [1]*, protégeant ainsi le ferrailage contre la corrosion.

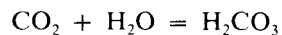
L'hydrate de calcium en solution donne une réaction avec l'anhydride carbonique de l'atmosphère (ou dissous dans l'eau) pour produire le carbonate de calcium (CaCO_3). La réaction est la suivante :



Ce processus s'appelle la « carbonatation ».

En cas d'écoulement dans le béton (reprises de bétonnage, joints), l'eau qui s'évapore laisse un dépôt de carbonate de calcium sur la paroi, désagréable à la vue (efflorescences). Dans certains cas, la carbonatation est bénéfique, par exemple si les pores du béton sont assez petits pour être obturés par les particules peu solubles de carbonate de calcium, empêchant ainsi toute évolution ultérieure. Mais, si le béton est relativement poreux, le phénomène progresse à mesure que l'eau interstitielle est renouvelée et que les produits de la réaction sont lessivés.

La décomposition s'accélère nettement en présence d'une teneur excédentaire en CO_2 dissous dans l'eau douce, par rapport au minimum nécessaire à la transformation de l'hydrate de calcium en carbonate de calcium. Cet anhydride carbonique excédentaire (souvent appelé CO_2 agressif) se combine avec l'eau pour former l'acide carbonique (H_2CO_3) qui, en présence de carbonate de calcium, donne le bicarbonate de calcium ($\text{Ca(HCO}_3)_2$). La chaîne est la suivante :



Au contraire du carbonate de calcium, le bicarbonate de calcium est très soluble dans l'eau ; il est ainsi très facilement lessivé. A la sortie du béton, l'évaporation laisse un dépôt de carbonate de calcium sur la paroi :



Au fur et à mesure que le lessivage continue et que l'hydrate de calcium est enlevé, le silicate de calcium hydraté, ainsi que l'aluminate de calcium hydraté, se décomposent, alimentant le processus en hydrate de calcium. Après un certain

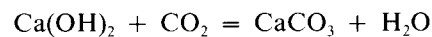
* Les chiffres entre crochets renvoient à la liste des références - chapitre 9.

2. TYPES OF ATTACK

2.1. SOFT WATER

Water draining from mountainous regions is often very pure with a low dissolved salts content. Such waters may have a fairly “ neutral ” pH value of about 7 but are nevertheless aggressive to concrete where they will tend to dissolve the calcium hydroxide in the set cement. All concretes manufactured from ordinary Portland cement contain various amounts of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). This is formed by the hydration of calcium oxide (CaO) and calcium silicates in the fresh, unhydrated cement. It is the calcium hydroxide and the associated alkaline pore solutions in set cement which make it strongly alkaline, with pH values generally in the order of 12.8 to 13.4 [1]*. This in turn protects any embedded reinforcement from corrosion.

Dissolved calcium hydroxide will react with carbon dioxide, either in the atmosphere or dissolved in the water, to give calcium carbonate (CaCO_3). The reaction involved is :

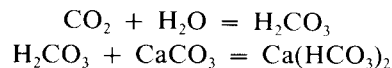


This process is known as carbonation.

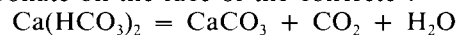
Where the water can pass through the concrete, typically at lift or construction joints, the water evaporates leaving an unsightly deposit of calcium carbonate on the face of the concrete, often called efflorescence. In some cases carbonation can be beneficial, for example where the concrete pores are sufficiently small that the relatively insoluble calcium carbonate can block them, thus stopping further attack and decomposition. Where concrete is relatively porous, however, the process will continue as fresh soft water is introduced to continue to attack and the products of the attack are removed.

The process of decomposition is markedly accelerated by the presence of dissolved CO_2 in the soft water over and above that required to convert the calcium hydroxide to calcium carbonate. This excess carbon dioxide (often known as aggressive CO_2) is free to react with water to form carbonic acid (H_2CO_3) which further reacts with the calcium carbonate to form calcium bicarbonate ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$).

The reactions involved are :



Unlike calcium carbonate, calcium bicarbonate is very soluble in water and is thus more readily removed. Once again, upon reaching the atmosphere, evaporation deposits calcium carbonate on the face of the concrete :



As the general leaching process described above continues and the bulk of the calcium hydroxide is removed, the hydrated calcium silicates and calcium aluminates decompose to provide further calcium hydroxide. Eventually all the

* Numbers between brackets refer to references - chapter 9.

temps, tout le ciment durci peut être décomposé, ne laissant qu'un résidu composé de granulats et d'hydrates de silice, d'oxyde de fer et d'alumine.

Il est évident que ce processus est lié à la nature des composants chimiques de l'eau. Pour connaître la probabilité d'attaque, il est important de tenir compte du pH de l'eau, mais celui-ci seul n'est pas une simple mesure de l'agressivité. Il faut également considérer l'alcalinité, la teneur totale en matières solides, la teneur en calcium et, selon l'exposé ci-dessus, le taux d'anhydride carbonique agressif. Voir le chapitre 4 « Analyses de l'eau ».

Enfin, il faut noter que la présence dans l'eau de chlorures solubles peut augmenter la solubilité des composés de calcium et par là, la probabilité de lessivage chimique.

2.2. SULFATES

Trois différents processus sont à l'origine de la détérioration du ciment Portland par l'action des sulfates :

1. La transformation de l'hydrate de calcium du ciment durci en sulfate de calcium hydraté, et la cristallisation de celui-ci, avec désordres dus au gonflement.

2. La transformation des aluminates de calcium hydratés et des ferrites en sulfo-aluminates et sulfo-ferrites hydratés, avec désordres dus au gonflement.

3. La décomposition des silicates de calcium hydratés, avec chute importante de la résistance mécanique.

On voit que les deux premiers processus ne sont pas de la même nature que celui faisant intervenir le lessivage du ciment. Dans ces cas d'attaque par les sulfates, il se forme, au cœur du béton, des composés insolubles dont le volume est supérieur à celui des matières constituantes. Ces composés gonflants provoquent la fissuration du béton et sa détérioration progressive.

Le troisième processus ci-dessus est différent. Il s'agit d'un mécanisme par lequel le sulfate de magnésium peut attaquer le béton. En effet, ce sulfate provoque une réaction avec le silicate de calcium hydraté de la pâte de ciment durcie, pour former l'hydrate de magnésium, la silice hydratée et le sulfate de calcium. Les produits ne sont pas gonflants, mais il en résulte une chute de la valeur du pH de la pâte de ciment, ouvrant la voie à la décomposition des silicates de calcium hydratés, identique à celle décrite ci-dessus au paragraphe 2.1. pour le lessivage de l'hydrate de calcium et du silicate de calcium hydraté en présence d'eau douce. On peut considérer qu'il s'agit là essentiellement d'une agression par le magnésium dans laquelle la totalité du calcium du liant peut être remplacée par du magnésium. Une telle agression sera augmentée par la présence de sulfates.

Les trois sulfates les plus communément rencontrés dans la nature sont :

- Sulfate de calcium (gypse ou sélénite)
- Sulfate de sodium (sel de Glauber)
- Sulfate de magnésium (sels d'Epsom).

Il est évident que la probabilité de rencontrer un de ces sels dissous dans l'eau dépend de leur solubilité respective. Celle-ci, exprimée en grammes (g) d'anhydride sulfurique (SO₂) par litre (l) de solution, est :

hardened cement can be decomposed in this way leaving only a residue of aggregate and hydrates of silica, iron oxide and alumina.

Clearly this process is related to the chemical constituents of the water. In considering the likelihood of attack, the pH value is an important factor but cannot on its own be taken as a simple measure of aggressivity. It is also necessary to take account of alkalinity, total solids content, calcium content and, from what has been stated before, aggressive carbon dioxide content. This is discussed further in Chapter 4, Water Analyses.

Lastly it should be noted that the presence of soluble chlorides in the water may render the calcium compounds more soluble, thus further increasing the likelihood of leaching.

2.2. SULPHATES

The deterioration of Portland cement concretes by sulphate attack can be described by the following three alternative processes :

1. The conversion of calcium hydroxide in the set cement to hydrated calcium sulphate and the crystallisation of this compound, with consequent expansion and disruption.
2. The conversion of hydrated calcium aluminates and ferrites to hydrated calcium sulpho-aluminates and sulpho-ferrites, again with consequent expansion and disruption.
3. The decomposition of hydrated calcium silicates with resulting serious loss of strength.

It can be seen that processes 1 and 2 are fundamentally different to that which occurs when cement compounds are leached. In these cases of sulphate attack, insoluble compounds develop within the concrete and these have volumes greater than those of the constituents from which they are formed. The formation of these expanded compounds cracks the concrete and causes progressive deterioration.

Process 3 is different and is one way in which magnesium sulphate can attack concrete. The magnesium sulphate reacts with the calcium silicate hydrates in the hardened cement paste producing magnesium hydroxide, hydrated silica and calcium sulphate. This is not an expansive process but rather lowers the pH value of the cement paste. This leads to a further decomposition of the calcium silicate hydrates in a similar fashion to that described in Section 2.1 for leaching of calcium hydroxide and calcium silicate hydrates by soft water. It may be argued that this is essentially an attack by magnesium, in which the entire calcium content of the binding agent may eventually be replaced by magnesium. Such an attack would be enhanced by the presence of sulphates.

The three principal sulphates liable to be encountered naturally are :

- Calcium sulphate (Gypsum or Selenite)
- Sodium sulphate (Glauber's salt)
- Magnesium sulphate (Epsom salts)

The extent to which these are likely to occur dissolved in water will naturally depend on their respective solubilities. Expressed as grams (g) of sulphur trioxide (SO₃) per litre (l) of solution, the solubilities of the above sulphates are :

- Sulfate de calcium : 1,2 g SO₃/l
- Sulfate de sodium : 200 g SO₃/l
- Sulfate de magnésium : 150 g SO₃/l

Puisque le béton est vulnérable, non pas directement aux sulfates à l'état solide, mais à leurs solutions dans l'eau, la solubilité des sulfates est d'un intérêt direct. Par exemple, une teneur en anhydride sulfurique égale à 1,2 g/l correspond à 2 000 mg/l (2 000 ppm) de sulfate de calcium (pour plus de détails, voir chapitre 4 « Analyses de l'eau »). Dans un sol très gypseux, les eaux souterraines risquent bien de contenir une telle concentration. Une teneur très supérieure indique la présence de sulfates de sodium ou de magnésium, ou les deux réunis.

Dans l'étude de l'agressivité des sulfates, il ne suffit pas de tenir compte de la seule teneur en ions sulfatés. Il faut également considérer les cations ou ions métalliques. Par exemple, dans le cas du sulfate de calcium, seul peut se produire le deuxième processus précité. Mais, avec une solution de sulfate de sodium, les deux premiers processus sont possibles. En présence de sulfate de magnésium, les trois processus peuvent intervenir. Il est à noter que, si le sulfate de calcium est relativement peu soluble dans l'eau, ce composé peut parfois naître au sein du béton par l'intermédiaire de réactions avec différents sulfates solubles.

Par ordre décroissant d'agressivité, les sulfates qui attaquent la pâte de ciment Portland sont les sulfates d'ammonium, de magnésium, de sodium et de calcium. Le sulfate d'ammonium ne se trouve pas normalement dans l'eau naturelle. Le sulfate de magnésium se trouve surtout dans l'eau de mer (voir paragraphes 3.2.4., 3.2.7. et 3.2.8.).

2.3. SULFURES

Les sulfures sont susceptibles de menacer le béton s'ils peuvent être oxydés pour former des sulfates et de l'acide sulfurique (voir ci-dessous le paragraphe 2.5. « Acides »).

2.4. CHLORURES

La détérioration du béton des barrages par l'action des chlorures est rare, la cause la plus probable étant l'épandage de sels pour déneiger les routes d'accès (à noter que les dégradations dues à l'eau de mer sont provoquées principalement par le sulfate de magnésium). Une teneur en ions de chlorure supérieure à 0,4 % du ciment (en poids) peut provoquer la corrosion des armatures dans un béton non carbonaté [2]. Les chlorures menacent les armatures par réduction de l'alcalinité effective du béton, par augmentation de la conductivité électrique de l'eau présente dans les pores du béton (favorisant le passage de courants corrosifs) et par neutralisation de l'effet de passivation des ions hydroxyles (permettant la formation de la rouille). Dans les rares cas rapportés concernant l'attaque directe du béton par les chlorures, les teneurs sont toujours très élevées; mais on a suggéré [3] que les ions de chlorure pouvaient aggraver sensiblement la micro-fissuration du béton, rendant le béton plus poreux et favorisant ainsi la carbonatation. La présence de chlorures peut réduire les effets de l'attaque par les sulfates (voir paragraphe 2.7).

- Calcium sulphate : 1.2 g SO₃/l
- Sodium sulphate : 200 g SO₃/l
- Magnesium sulphate : 150 g SO₃/l

As concrete is not directly attacked by the solid sulphates, but rather by their solutions in water, their solubility is of direct interest. For example, a sulphur trioxide concentration of 1.2 g/l corresponds to 2 000 mg/l, or parts per million (ppm), of calcium sulphate (this is covered further in Chapter 4, Water Analyses). If the ground is heavily charged with gypsum the ground water may well contain nearly that amount. A much higher concentration would indicate the presence of sodium and/or magnesium sulphates.

In considering the aggressivity of sulphates to concrete it is insufficient to consider only the sulphate ion concentration. The cation or metal ions involved have to be considered as well. For example, in the case of calcium sulphate, only process 2 above can occur. With sodium sulphate solution, processes 1 and 2 may occur. In the presence of magnesium sulphate all three processes can take place. It should be noted that although calcium sulphate is relatively insoluble in water it may form in the concrete through reactions with other soluble sulphates.

Arranged in descending order of aggressiveness, those sulphates which attack Portland cement paste are those of ammonium, magnesium, sodium, and calcium. The most aggressive, ammonium sulphate, is not normally found in natural water. The second most aggressive, magnesium sulphate, is found primarily in sea water, see, however, Sections 3.2.4, 3.2.7 and 3.2.8.

2.3. SULPHIDES

Sulphides are potentially dangerous where they are able to oxidize to sulphates and free sulphuric acid, see Section 2.5, Acids.

2.4. CHLORIDES

Chloride attack is unusual in dam concrete and most likely to be encountered via de-icing salts from associated roads (note that sea water attack is principally from magnesium sulphate). Chloride ion concentrations greater than 0.4 % by mass of cement can lead to the corrosion of reinforcement in uncarbonated concrete [2]. Chlorides threaten embedded reinforcement by reducing the effective alkalinity of the concrete, by increasing the conductivity of the concrete pore water, thus enhancing the flow of electrical corrosion currents, and by overcoming the passivating effect of the hydroxyl ions, allowing rusting to take place. Direct attack on concrete by chlorides is sparsely documented and then only at very high levels, though it has also been suggested [3] that chloride ions may significantly increase micro-fissuring leading to a more porous concrete and hence easier carbonation. Interestingly the presence of chlorides can reduce the effects of sulphate attack, see Section 2.7.

2.5. ACIDES

Les liquides contenant des acides à l'état libre ont un effet de dissolution sur la pâte de ciment et les granulats carbonatés. Il s'agit, entre autres, de trois acides minéraux (sulfurique, chlorydrique, nitrique), de l'acide carbonique et des acides organiques à l'état libre. D'autres possibilités d'attaque par les acides font intervenir les sulfures et l'anhydride sulfureux. Une source possible d'acides minéraux à l'état libre est constituée par les effluents industriels. Mais ils proviennent plus fréquemment des sulfures, comme indiqué précédemment.

L'acide sulfhydrique (H_2S) peut apparaître dans les retenues après décomposition de la végétation inondée. La teneur dissoute dans l'eau est rarement assez élevée pour présenter un problème sérieux; cependant, les percolations d'eau chargée d'acide sulfhydrique, dans la fondation d'un barrage, risquent de provoquer une accumulation de gaz dans les ouvrages souterrains ou dans les galeries mal ventilées. A l'état gazeux, l'acide sulfhydrique (ou hydrogène sulfuré) peut pénétrer dans le béton sec, ou se dissoudre dans la pellicule d'eau présente sur le béton mouillé, pour former de l'acide sulfurique, ou des sulfates (en présence d'air). Ces composés sont agressifs pour le béton et, dans l'Annexe A, on cite plusieurs cas de détériorations superficielles graves de parois de galeries de barrages par ce mécanisme. Par ailleurs, la production d'acide sulfurique est parfois favorisée par l'action bactériologique (par exemple, au barrage de Clendening, États-Unis). Les bactéries capables d'oxyder le fer (thiobacillus ferro-oxydant) ajoutent une étape supplémentaire d'oxydation qui ne correspond pas à une réaction purement chimique [4].

Les sulfures insolubles dans l'eau (pyrites, marcassites, pyrrhotines) peuvent également s'oxyder et donner des sulfates et de l'acide sulfurique libre en présence d'oxygène atmosphérique et d'eau. Lea [5] cite un cas, en Norvège, de schistes contenant de la pyrrhotine, qui s'oxyde facilement pour former des sulfates et de l'acide sulfurique libre. On constate des valeurs du pH des eaux souterraines de 5 à 6 et, dans un cas extrême, de 2,5. Il cite également un autre cas intéressant d'un tunnel au sud-est de l'Angleterre, excavé sous air comprimé dans un sable riche en pyrite. Le pH de l'eau souterraine, initialement neutre, fut réduit à 1,8 par l'oxydation des pyrites due à la présence de l'air comprimé. Ici aussi, la production d'acides par ce mécanisme peut être favorisée par la présence de certaines bactéries (voir Annexe A « Barrage d'El Atazar, Espagne »).

L'anhydride sulfureux provient surtout des gaz de combustion. A l'état gazeux, il peut pénétrer dans le béton sec ou se dissoudre dans la pellicule d'eau recouvrant le béton humide, donnant naissance à de l'acide sulfureux et à des sulfites ou, en présence d'oxygène, à de l'acide sulfurique et à des sulfates.

Depuis quelques années, on s'intéresse beaucoup à un certain type d'attaque par l'anhydride sulfureux constituée par la « pluie acide » [6]. La combustion des hydrocarbures fossiles donne de l'anhydride sulfureux et, à température plus élevée, des oxydes d'azote. Par des réactions chimiques par voie humide (dans les nuages) ou gazeuse (hors des nuages) dans l'atmosphère, il y a formation d'acide sulfurique, de nitrates et d'acide nitrique. Dans les zones à forte pluviométrie, où le sol contient peu de calcium pour les neutraliser (sous-sol granitique, schisteux (ardoise), gréseux, gneissique, basaltique,...), ces composés s'accumulent dans le sol.

Dans certains lacs du sud de la Norvège, on a constaté une baisse de la valeur du pH (augmentation de l'acidité) de 0,5 à 1 sur 20 à 30 ans par suite de ce

2.5. ACIDS

Liquids containing free acids will have a dissolving effect on cement paste and on aggregates containing carbonate. Such acids include three mineral acids (sulphuric, hydrochloric and nitric), carbonic acid and free organic acids. Potential sources of acid attack also include sulphides and sulphur dioxide. One potential direct source of free mineral acids is industrial waste water. More commonly they are encountered via the sulphides mentioned previously.

Hydrogen sulphide (H_2S) can be formed in reservoirs by the degradation of inundated vegetable matter. Concentrations within the water are unlikely to be high enough to cause serious problems; however, percolations of hydrogen sulphide bearing seepage water through dam foundations can lead to build-ups of gas in underground works, or in other galleries where ventilation is inadequate. It can penetrate in gaseous form into dry concrete or dissolve in the film of water on moist concrete forming sulphuric acid and sulphates on access of air. These will directly attack the concrete and there are several cases cited in Appendix A where severe surface attack has occurred within dam galleries due to this process. Sulphuric acid production is also sometimes assisted by the action of bacteria (eg Clendening Lake dam, USA). Iron oxidising bacteria of the thiobacillus ferro-oxidans species introduce an extra oxidation step which does not occur as a purely chemical reaction [4].

Water insoluble sulphides such as pyrites and marcasites and pyrrhotites may also be oxidised into sulphates and free sulphuric acid on access of atmospheric oxygen and moisture. Lea [5] quotes cases in Norway of shales containing pyrrhotite which also oxidises readily to sulphates and free sulphuric acid. This has produced ground waters with a pH of 5 to 6 and in one exceptional case 2.5. He also quotes another interesting case of a tunnel in south-east England, driven through pyrite bearing sands using compressed air. The ground water, originally neutral, was reduced to a pH of 1.8 by the oxidation of the pyrites due to the introduction of the compressed air. Once again the production of acids from this source can be enhanced by the presence of bacteria (eg. Appendix A, El Atazar dam, Spain).

Sulphur dioxide is mainly contained in combustion gases. It can also penetrate in gaseous form into dry concrete or dissolve in the film of water on moist concrete, forming sulphurous acid and sulphites or, in the presence of oxygen, sulphuric acid and sulphates.

One form of sulphur dioxide attack which has received considerable attention in recent years is via acid rain [6]. Burning fossil fuels produces sulphur dioxide and, at higher temperatures, oxides of nitrogen. These undergo wet-phase (in cloud) and gas-phase (out of cloud) reactions in the atmosphere to produce sulphuric acid, nitrates and nitric acid. These in turn can build up in high-rainfall areas where soils contain little calcium to neutralize them, for example where the underlying geology comprises granite, slate, sandstone, gneiss, basalt, etc.

Lakes in southern Norway have shown pH drops (i.e. increased acidity) of 0.5 to 1 over 20 to 30 years as a result of this action. Increased acidity levels have also

mécanisme. L'augmentation de l'acidité a été également observée en Suède, Finlande (après la fonte des neiges au printemps), Danemark, Belgique, Allemagne Fédérale, Tchécoslovaquie, Pays-Bas, Canada, Grande-Bretagne (Angleterre, Écosse, Pays de Galles) et États-Unis. Il n'y a pas d'observations d'attaque du béton des barrages par la pluie acide, mais, chaque fois que la valeur du pH de l'ensemble d'un lac ou d'un cours d'eau se trouve ainsi réduite, il faut conclure à un effet néfaste pour le béton dans cette zone.

Les études effectuées au Pays de Galles montrent que l'acidité des écoulements alimentés par la pluie acide est renforcée par la mise en place de plantations de résineux. Les polluants sont concentrés par l'évapo-transpiration accrue, les cations basiques dans le sol sont absorbés par les arbres, et de meilleures conditions de drainage augmentent le débit d'écoulement, ce qui a pour effet de réduire le lessivage du calcium et du magnésium, et de favoriser l'oxydation du soufre et de l'azote.

L'acide carbonique est produit essentiellement par dissolution de l'anhydride carbonique par la pluie lors de son passage dans l'atmosphère. On trouve cet acide dans l'eau des plateaux marécageux et des zones montagneuses.

Les acides organiques à l'état libre, produits par les matières végétales, dissolvent le calcium du ciment pour former les sels correspondants. Normalement, ils sont moins agressifs que les acides inorganiques. Ici encore, on les trouve dans les eaux des plateaux marécageux. Par exemple, l'acide humique, résultant de la décomposition de la tourbe, réagit avec la chaux en produisant l'humate de calcium.

2.6. VÉGÉTATION

Lors d'une série d'inspections de barrages écossais [7], dans les années soixante, on a souvent observé des surfaces de béton envahies par la mousse, le lichen et les algues. Dans les zones de forte humidité notamment, la mousse, bien ancrée dans le béton, ne fut enlevée qu'au prix d'un décapage ou d'un brossage énergique. En dessous, la surface était rongée par les racines de la mousse, exposant à l'attaque des agents extérieurs ce qui fut jadis une surface dure. On a noté que les parements inclinés et humides étaient plus vulnérables aux mousses que les surfaces à l'abri de la pluie et que celles, plus sèches, bénéficiant d'un plus grand ensoleillement. On a également noté une meilleure résistance à la croissance des mousses sur les bétons fabriqués avec un entraîneur d'air, un ciment de laitier, ainsi que sur les surfaces bien coffrées constituées d'un béton dense et présentant peu de défauts superficiels.

2.7. AGRESSIONS COMBINÉES

Les conditions locales peuvent associer deux ou plusieurs formes d'attaque décrites dans les chapitres précédents. Dans de telles circonstances, l'effet est généralement plus sévère que dans le cas d'une seule forme d'attaque.

Le lessivage du ciment par l'eau pure est accéléré par la présence d'anhydride carbonique à l'état libre et/ou d'acides. Les sulfates et le magnésium augmenteront l'agressivité de l'eau douce ou acide et également l'agressivité réciproque. A son tour, l'eau acide augmentera l'agressivité des sulfates.

been recorded in parts of Sweden, Finland (following spring snow melts), Denmark, Belgium, West Germany, Czechoslovakia, Holland, Canada, the UK (including Scotland, Wales and England) and the USA. Specific attacks on dam concrete due to acid rain have not been documented, but wherever the general pH value of lake and river water is lowered in this way the effect on concrete must tend to be adverse.

Studies in Wales have shown that the acidity of acid rain run-off is further intensified by the introduction of conifer plantations. Pollutants become concentrated by the increased level of evapotranspiration, base cations in the soil are removed by tree uptake and improved drainage increases run-off rates which in turn reduces calcium and magnesium leaching while increasing the oxidation of sulphur and nitrogen.

Carbonic acid is formed principally by rainwater dissolving carbon dioxide during its passage through the air. Carbonic acid in water is typically encountered in high moorland or mountain water.

Free organic acids from vegetable products dissolve calcium from the cement paste to form their corresponding salts. They are usually less aggressive than inorganic acids. They can again be typically encountered in waters from high moorlands. For example humic acid, arising from the decay of peat, will react with lime to form calcium humate.

2.6. PLANT GROWTH

During the course of a series of inspections of Scottish dams [7] which took place in the 1960s, it was discovered that many concrete surfaces had been severely affected by the growth of moss, lichens and algae. Particularly in areas of high humidity, moss which had gained a firm hold on the concrete surface could only be removed after vigorous scraping or wire brushing. The removal revealed that the moss roots had eaten into the concrete surface beneath, leaving what had originally been a hard surface, open to further attack from the environment. It was noted that damp and sloping surfaces were far more prone to moss growth than sheltered surfaces protected against rain and those drier surfaces which received more sunlight. Resistance to moss growth was also apparent where air entraining agents had been used in the concrete, where blast furnace cement had been used in the mix and also on surfaces which had been well formed using a dense mix and with minimal amounts of surface defect.

2.7. COMBINED ATTACKS

Field conditions may combine two or more of the forms of attack described in the preceding sections. In such circumstances the effect is generally more severe than for any one of the forms alone.

Leaching of cement paste by pure water is accelerated by the presence of free carbon dioxide and/or acids. Both sulphates and magnesium will enhance the aggressivity of soft or acidic water and also the aggressivity of each other. Acidic water will in turn enhance the aggressivity of sulphates.

On a mentionné que les chlorures pouvaient accélérer d'autres formes d'attaque en augmentant la microfissuration conduisant à un béton plus poreux. Cependant, les chlorures présentent l'avantage de réduire les effets de l'attaque par les sulfates. Ils favorisent la dissolution des sulfates agressifs ainsi que des produits expansifs associés qui se forment à l'intérieur du béton. Cela ralentit les effets de dislocation dus à l'attaque par les sulfates et, dans certains cas, l'arrête totalement.

L'effet est particulièrement manifeste avec l'eau de mer, pour laquelle l'agressivité des sulfates est notablement inférieure, en raison de la présence des chlorures, à ce qu'elle serait si les mêmes sulfates étaient seuls présents.

It has been mentioned that chlorides may accelerate other forms of attack by increasing micro-fissuring, leading to a more porous concrete. Interestingly though, chlorides are beneficial in reducing the effects of sulphate attack. They aid the dissolution of both the aggressive sulphates and the associated expansive products which form within the concrete. This effectively slows down the disruptive effects of sulphate attack, in some cases stopping it altogether.

The effect is particularly obvious with sea water, in which the aggressivity of the sulphates that are present is noticeably less, due to the presence of chlorides, than it would be were the same sulphates present alone.

3. ZONES A RISQUE ÉLEVÉ

3.1. GÉNÉRALITÉS

Les zones à risque élevé sont classées selon l'implantation géographique de l'ouvrage et selon la situation des parties d'ouvrage dans l'ensemble. Ces deux catégories sont traitées respectivement dans les paragraphes 3.2 et 3.3 ci-dessous.

3.2. ZONES GÉOGRAPHIQUES

3.2.1. Eau de montagne ou des plateaux marécageux

Les écoulements provenant des montagnes à sous-sol igné, siliceux ou calcaire (calcaire dense, pas ou peu perméable) sont très pauvres en sels dissous mais l'eau est acide par suite de la présence d'anhydride carbonique dissous. Dans le cas des plateaux marécageux, les écoulements peuvent également contenir de l'acide humique, dû à la décomposition de la tourbe. Une solution saturée d'acide humique présente un pH de 3,6 à 4,1 [5] mais la solubilité dans l'eau est faible. Une attaque du béton peut avoir lieu, mais, dans ce cas, les produits de la réaction (humate de calcium) sont quasi insolubles.

Un plus grand risque correspond à l'anhydride carbonique (CO_2) en solution (voir paragraphe 2.1. ci-dessus). Les eaux pures sont capables de dissoudre l'hydrate de calcium et/ou le carbonate de calcium présents dans le ciment durci, à raison de 1,2 g d'équivalent d'oxyde de calcium par litre. L'anhydride carbonique en solution donne rarement un pH inférieur à 5,5 et les eaux des plateaux marécageux, pauvres en sels, présentent généralement une valeur comprise entre 4 et 7. Une valeur inférieure à 4 indique la présence d'acides minéraux à l'état libre.

Le niveau d'acidité des eaux des plateaux marécageux est maximal après une période de fortes pluies et après une période chaude et sèche. Dans le deuxième cas, il faut conclure à l'effet d'une accélération du taux de production d'acide humique dans la tourbe.

3.2.2. Eaux des basses terres marécageuses ou des marais

Les eaux des marécages présentent rarement une acidité due à l'acide humique produit par la décomposition de la tourbe, puisque généralement le sol renferme des quantités suffisantes de chaux pour neutraliser cet effet. Cependant, la tourbe contient parfois des sulfures de fer (pyrite, marcassite) dont l'oxydation, favorisée par le marnage, aboutit à la production d'acide sulfurique à l'état libre (paragraphe 2.5 ci-dessus). Cet acide peut, soit réagir avec les sels dans le sol pour produire des sulfates (par exemple, du gypse est formé lorsque l'acide sulfurique se combine avec du calcaire), soit, s'il est en excès, rester à l'état libre.

3.2.3. Sous-sol igné ou siliceux

Si le sous-sol comporte du granite, du schiste ardoisier, du grès, du gneiss, du basalte, etc., les eaux correspondantes sont fréquemment pauvres en ions calciques,

3. PLACES OF HIGH RISK

3.1. GENERAL

Places where concrete is at particularly high risk of attack can be considered both in terms of geographical location and in terms of particular locations within a dam or structure. Sections 3.2 and 3.3 below deal with these aspects respectively.

3.2. GEOGRAPHICAL LOCATION

3.2.1. Mountain or High Moorland Water

Waters draining from mountains where the underlying geology is igneous, siliceous or dense limestone (allowing little or no water penetration) will be almost free of dissolved salts but will be acidic due to the presence of dissolved carbon dioxide. Water draining from high moorland may in addition contain humic acid from peat decay. A saturated solution of humic acid has a pH of 3.6 to 4.1 [5] but the acid has a low solubility in water. Some attack of concrete may occur, producing calcium humate which is virtually insoluble.

A more important source of attack is likely to be from dissolved carbon dioxide in the manner described earlier in Section 2.1. Pure waters have the ability to dissolve calcium hydroxide and/or calcium carbonate from the set cement at the rate of 1.2 grams of equivalent calcium oxide/litre. Dissolved carbon dioxide rarely gives rise to pH values of less than 5.5 and salt-free, high moorland waters generally have pH values of between 4 and 7. A value lower than 4 would indicate the presence of free mineral acids.

Acidity levels of high moorland water are greatest after periods of heavy rain and also following warm, dry periods, the latter condition probably favouring increased production rates of humic acid in the peat.

3.2.2. Low Moorland or Marsh Water

Marsh waters are unlikely to be acid from peat decay and humic acid production, as the lime content of soils is usually adequate to neutralize this. The peats, however, might also contain iron sulphides in the forms of pyrites or marcasite. Oxidation of these, which will be enhanced under fluctuating water level conditions, will lead to the production of free sulphuric acid, see Section 2.5. This in turn will either react with soil salts to give sulphates (e.g. gypsum is formed when sulphuric acid reacts with limestone) or, if in excess, will remain as free acid.

3.2.3. Igneous and Siliceous Geology

Wherever the underlying geology is composed of granite, slate, sandstone, gneiss, basalt, etc., there is a likelihood that associated waters will be deficient in

parfois avec un faible pH, et peuvent par conséquent présenter un risque pour le béton.

3.2.4. Zones naturellement riches en sulfates

Là où les sulfates sont présents naturellement (gypse sous diverses formes, etc.), il y a risque d'attaque du béton par le processus décrit au paragraphe 2.2. On doit procéder avec soin aux dosages de la teneur en sulfates de l'eau, car les variations sont parfois importantes (voir chapitre 4.4.).

Les sulfates tels que le gypse se trouvent plus fréquemment dans les sols argileux, dans certains dépôts d'origine marine et en association avec les différentes formes de pyrite (voir aussi paragraphe 3.2.8.).

3.2.5. Zones naturellement riches en sulfures

Comme il est dit aux paragraphes 2.3. et 3.2.2., les sulfures sont potentiellement dangereux car leur oxydation donne de l'acide sulfurique à l'état libre, et parfois, indirectement, des sulfates. Les effets des sulfates sont examinés au paragraphe 2.2. La présence locale de sulfures, tels que la pyrite, incite donc à la prudence. Les sulfures qui sont immergés en permanence (par exemple, dans un sol sous un bassin d'amortissement) ne risquent pas de nuire, à moins d'une oxydation importante pendant le chantier. Par contre, les mêmes sulfures dans les versants soumis à des cycles d'humidification/assèchement par le marnage de la retenue présentent un problème plus grave à plus ou moins longue échéance.

Les sulfures tels que la pyrite sont souvent associés à des métaux précieux (or, cuivre,...) [8]. On les trouve également en présence d'ardoises et schistes [9], schistes argileux, sables, grès [5] et dans les zones marécageuses (paragraphe 3.2.2. ci-dessus). Enfin, on les trouve également sous forme de produits de remplacement, en particulier de calcaires, et dans les filons associés à des roches ignées en association notamment à des minéraux comme le quartz, la calcite, la baryte et la fluorine (spat fluor).

3.2.6. Sol pollué et déchets

Outre la présence naturelle d'agents agressifs, ceux-ci sont parfois produits par divers déchets et effluents polluant le sous-sol et la nappe phréatique.

Barry [2] donne une liste de 123 produits chimiques agressifs et des principales industries de production ou d'utilisation. Les stériles des houillères sont souvent très agressifs car ils renferment des sulfates et, aussi, des sulfures [10] provoquant souvent une forte acidité.

Les sites de production de gaz de houille sont parfois très pollués par le sulfate d'ammonium, un produit très agressif qui attaque le béton plus comme un acide sulfurique que comme un sulfate courant. Le sulfate d'ammonium attaque tous les types de ciment. Les sites sidérurgiques, les sites d'élaboration de produits chimiques et les exploitations minières exigent tous une étude approfondie. Les matériaux, comme les scories, la brique et les cendres ont souvent une forte teneur en sulfates solubles. Lea [11] décrit le site d'une raffinerie d'or, abandonnée depuis longtemps, où il y avait 0,01 g d'acide sulfurique par 100 g de sol, ainsi que 1 % d'anhydride sulfurique, de sulfate de cuivre et de sulfate de calcium. Un béton massif de bonne qualité était endommagé jusqu'à une profondeur de 200 mm.

calcium ions, possibly with a low pH value, and be potentially aggressive towards concrete.

3.2.4. Natural Sulphate Rich Areas

Wherever sulphates occur naturally, such as in the various forms of gypsum, there is a risk of concrete attack in the manner described in Section 2.2. Care should be taken in testing water for sulphate content as considerable variations can occur, see Section 4.4.

Sulphates such as gypsum are more common in clay soils, in some deposits of marine origin and in association with the various forms of pyrites. See also Section 3.2.8.

3.2.5. Natural Sulphide Rich Areas

As mentioned in Sections 2.3 and 3.2.2, sulphides are potentially dangerous as they can oxidise to give free sulphuric acid and may also, indirectly, produce sulphates. The effects of sulphates are discussed in Section 2.2. The local presence of sulphides, such as iron pyrites, should therefore lead to caution. Sulphides which are permanently submerged, such as in ground below a stilling basin, are unlikely to prove a threat, unless extensive oxidation occurs during construction. The same sulphides in the sides of a valley, subject to alternate wetting and drying from fluctuating reservoir levels, would represent a more serious long-term problem.

Sulphides such as pyrites are often found in association with gold, copper and other valuable metals [8]. They may also occur in conjunction with slates and schists [9], shales, sands and sandstone [5] and marshes, see Section 3.2.2. Sulphides can occur as replacements, particularly of limestones and in veins associated with igneous rocks, notably with minerals such as quartz, calcite, barytes and fluorspar.

3.2.6. Contaminated Ground and Waste Products

Over and above the natural occurrence of aggressive agents, such agents may result from various forms of waste products which contaminate both ground and ground water.

Barry [2] lists 123 aggressive chemicals together with the main industries which involve their use or production. Colliery waste can be particularly aggressive in terms of sulphates and also sulphides [10] which in turn can lead to high acidity levels.

Coal gas sites may be heavily contaminated with ammonium sulphate. This is particularly aggressive and acts on concrete more like sulphuric acid than normal sulphates. It attacks all types of cement. Steelworks, sites of chemical processing and mine workings should all be assessed carefully. Clinker, brick rubble and ashes are likely to be high in soluble sulphates while Lea [11] records a long disused gold refinery with 0.01 grams of sulphuric acid per 100 grams of soil and 1 % sulphur trioxide and copper and calcium sulphates. Good mass concrete had been damaged to a depth of 200 mm.

Comme exemples d'attaque résultant d'activités industrielles, on peut citer les barrages de la rivière Monongahela et les écluses nos 3, 4, 7 et 8, ouvrages qui ont subi d'importantes détériorations, au cours de leurs 50 ans de vie, par les eaux acides de drainage d'une mine de charbon (voir Annexe A). Le pH de l'eau de la rivière a atteint une valeur basse de 3,8 et on a dû procéder à d'importantes réparations et reconstructions. Des valeurs de pH aussi basses que 2,0 ont été également indiquées pour un autre réservoir recevant des eaux de drainage d'une mine de charbon.

L'attaque peut également résulter des eaux polluées par les effluents domestiques et industriels ordinaires. Par exemple, au barrage de Rasqao au Brésil [12] (voir Annexe A), on prévoit d'importants travaux de remise en état suite à la détérioration du béton jusqu'à 150 mm de profondeur, qui s'est produite relativement vite et qui est due aux eaux fortement chargées en sulfates, nitrates et anhydride carbonique.

3.2.7. Eau de mer

Le principal constituant de l'eau de mer, susceptible d'attaquer le béton, est le sulfate de magnésium. Mais, ce problème se pose seulement pour des barrages de maîtrise des marées dans les fleuves, ou peut-être, pour des barrages classiques dans les zones côtières (voir également le paragraphe 3.2.8.).

3.2.8. Dépôts d'origine marine

Les retenues situées sur des dépôts d'origine marine peuvent donner lieu à des percolations dont les eaux contiennent des sulfates de calcium, de sodium et de magnésium. De tels dépôts peuvent également présenter une teneur élevée en chlorures qui, à leur tour, augmenteront la dissolution du sulfate de calcium (voir paragraphe 2.7.).

3.3. ZONES DANS LES OUVRAGES

3.3.1. Chemins potentiels d'écoulement

Les parties d'un barrage et de ses ouvrages annexes, présentant un chemin potentiel d'écoulement, risquent d'être attaquées si l'eau est agressive. L'écoulement évacue les produits de l'agression et assure une réalimentation en agents agressifs permettant la poursuite du phénomène. Si le béton est entièrement immergé (galerie hydraulique,...), les produits de l'agression sont évacués sans être vus. Si l'écoulement passe à travers le barrage, avec évaporation sur le parement aval, la détérioration causée par l'eau douce est signalée par les dépôts (efflorescences) laissés sur le parement (paragraphe 2.1.). En cas d'attaque par les sulfates, l'évaporation peut provoquer l'accumulation de grandes quantités de sulfates au cœur du béton. Les parties associées aux barrages à considérer comme vulnérables aux agents agressifs transportés par les écoulements comprennent :

— Voies d'eau : prises d'eau, galeries, ouvrages de restitution, bassins de dissipation, évacuateurs, écluses, conduites en béton, conduits de drainage, ouvrages d'amenée d'eau, bâches et aspirateurs d'usines hydroélectriques; également, zones adjacentes aux ouvrages de restitution et soumises à une aspersion ou une projection continue et régulière d'eau évacuée.

Good examples of industrial process attack are represented by Monongahela River Dams and Locks Nos. 3, 4, 7 and 8 where widespread deterioration has occurred during the 50 year lives of the structures due to acid water from coal mine drainage, see Appendix A. The pH of the river water has reached a low of 3.8 and repairs and major reconstruction have taken place. Values for pH as low as 2.0 have also been unofficially reported for one other reservoir receiving coal mine drainage.

Attack may also result from water contaminated with general industrial and domestic sewage. Major remedial work is envisaged on the Rasqao dam in Brazil [12], see also Appendix A, where such water, heavily contaminated with sulphates, nitrates and carbon dioxide, has attacked concrete to a depth of 150 mm, in a relatively short space of time.

3.2.7. Sea Water

The principal agent in seawater which is likely to be aggressive towards concrete is magnesium sulphate. The dam engineer will generally only meet seawater if he becomes involved in tidal barrage schemes, or possibly conventional dams in coastal areas. See also Section 3.2.8.

3.2.8. Deposits of Marine Origin

Reservoirs sited in deposits of marine origin may produce seepage water containing calcium, sodium and magnesium sulphates. Such deposits may also feature a high level of chloride which will in turn enhance the dissolution of calcium sulphate, see Section 2.7.

3.3. STRUCTURAL LOCATIONS

3.3.1. Potential Flow Paths

Any part or aspect of a dam which presents a potential flow path to water is liable to be attacked if the water is aggressive. The flow enables the products of the aggressive attack to be removed and fresh agents introduced to continue the attack. When the concrete being attacked is completely submerged, such as in a tunnel, the products of the attack will be carried away effectively unseen. Where flow takes place through a dam with the water evaporating on the downstream face, soft water attack will be evident by efflorescence on the concrete surface, see Section 2.1. In the case of sulphate attack the same evaporation process can lead to a high build up of sulphates within the concrete. Areas associated with dams which can be regarded as potentially dangerous with regard to aggressive agents carried by water flow include :

— Water passages such as intakes, tunnels, outlets, stilling basins, spillways, locks, concrete penstocks, drainage passageways and power plant flumes, spiral cases and draft tubes. Also areas which are adjacent to outlets and which become subjected to prolonged and regular spray or splash from released water.

- Zones de béton poreux ou de faibles caractéristiques, à faible dosage et à rapport eau/ciment (E/C) élevé.
- Joints secs, surfaces de reprise, fissures [7].
- Joints d'articulation.
- Partie basse du barrage où la différence de charge hydrostatique est maximale [7].
- Rideaux d'injection.
- Surfaces de contact béton-rocher.
- Zones de marnage, zones exposées aux vagues.
- Béton adjacent à un remblai perméable.
- Ouvrages en béton de faible épaisseur.
- Éventuellement, zones avec armatures à haute limite élastique, où le niveau élevé des contraintes provoque une fissuration générale plus importante, avec augmentation de la perméabilité [13].
- Béton de deuxième phase, tel celui scellant les glissières de vannes, où le compactage du béton est difficile, où des joints existent et où des gradients de pression peuvent être élevés localement.
- Zones nouvellement bétonnées, plus perméables que le béton plus ancien (voir paragraphe 6.2.).

En ce qui concerne le deuxième point de cette liste, il est à noter que les barrages construits en Suède avant 1930 [14] avec un dosage en ciment de 150 à 200 kg/m³ et un rapport E/C compris entre 0,8 et 1 ont connu de graves problèmes. Dans certains barrages récents construits en béton compacté au rouleau, le dosage est encore plus réduit et l'on peut indiquer qu'une analyse du potentiel d'agression de l'environnement et de l'eau de la retenue devrait faire partie intégrante de l'étude de tels ouvrages.

En ce qui concerne les percolations dans les joints, reprises et fissures, une étude intéressante est citée par Fristrom et Sallstrom [14]. La Fig. 1 montre les effets résultant du lessivage par l'eau traversant une fissure et l'effet sur le béton environnant. Dans la Fig. 2, on voit comment les variations de température influent sur le lessivage. En hiver, lorsque les plots du barrage se contractent et que les joints s'ouvrent, il y a augmentation du débit et, par là, du lessivage.

3.3.2. Zones avec armatures ou autres aciers noyés

Les zones de béton armé exigent un soin particulier puisque la dégradation du béton et la mise à nu du ferrailage qui est alors exposé à la corrosion accélèrent les désordres et peuvent compromettre la tenue de l'ouvrage. On a suggéré qu'un niveau de contrainte élevé dans les armatures pouvait accélérer le lessivage (paragraphe 3.3.1. ci-dessus). Un ferrailage dense risque aussi de nuire au bon compactage du béton et de donner lieu à des chemins de percolation.

Beeby [13] cite une enquête sur la corrosion des ouvrages en mer, qui indique que les coins carrés sont particulièrement sensibles; par exemple, une simple dalle épaisse est moins vulnérable qu'une dalle mince sur poutres intermittentes. On n'a observé aucun cas de corrosion des armatures ou d'écaillage du béton sur les sections arrondies ou circulaires. Cette constatation est peut-être applicable aux barrages.

- Areas of weak or porous concrete with a low cement content and high water/cement ratio.
- Cold joint, lift lines and cracks [7].
- Movement joints.
- The lower part of dam walls where the differential pressure head is greatest [7].
- Grout curtains.
- Concrete/rock interfaces.
- Zones exposed to wave action or rising and falling reservoir water.
- Concrete adjacent to porous backfill.
- Thin concrete sections.
- Possibly areas reinforced by high tensile steel where the high stress levels cause greater overall cracking and enhanced permeability [13].
- Second stage concrete, such as around gate guides, where concrete compaction is difficult, cold joints exist and local pressure gradients can be high.
- Areas of fresh concrete, which is more permeable than older concrete, see Section 6.2.

With regard to the second point above it should be noted that serious problems were encountered with Swedish dams built prior to 1930 [14] where cement contents of 150 to 200 kg/m³ were associated with water/cement ratios of 0.8 to 1.0. Even lower cement contents have been used in some recent roller compacted concrete dams, suggesting that the potential aggression of the environment and of the impounded water should be a particular feature of the investigations for such dams.

With regard to flow through joints and fissures an interesting study is quoted by Fristrom and Sallstrom [14]. Fig. 1 shows the effect of leaching water passing through a crack and the effect on immediately adjacent concrete. Fig. 2 further demonstrates how temperature variations can affect leaching. During winter months, as dam blocks contract and contraction joints open, leaking and hence leaching both increase.

3.3.2. Areas with Reinforcement or Embedded Parts

Particular care should be taken in reinforced areas as degradation of the concrete and the corrosion of reinforcement will accelerate concrete disruption and may threaten the integrity of the structure. It has been suggested that high steel stresses may accelerate leaching, see 3.3.1. above. Areas of dense reinforcement will also increase the risk of poorly compacted concrete and hence seepage paths.

Beeby [13] refers to a survey [15] of corrosion in ocean structures, which noted that square corners were particularly vulnerable to attack and that simple thick slab construction is less vulnerable than thin slabs supported by integral, intermittent beams. Furthermore no cases of reinforcement corrosion and spalling of concrete were evident in curved or circular sections. These findings may have some relevance to dams.

On notera que la corrosion des aciers noyés dans le béton est un processus électrolytique, avec le béton et l'eau, sels et oxygène qu'il contient, agissant comme milieu électrolytique. Des variations de propriétés à la surface des aciers, dues à des impuretés ou à des dépôts de laminage, entraînent le développement de piles électrolytiques locales. Le fer subit une dissolution dans les zones anodiques et des électrons sont libérés vers les zones cathodiques où ils se combinent avec l'hydrogène et l'oxygène pour former des ions hydroxyles. Les ions ferreux libérés aux anodes se combinent alors avec les ions hydroxyles pour former l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) qui, en présence d'oxygène à l'état libre, se transforme à son tour en oxyde ferrique ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ou rouille. Les produits de corrosion occupent un volume nettement plus grand que celui de l'acier enlevé. Cela engendre localement de fortes pressions de gonflement sur le béton, provoquant une dislocation et exposant l'acier à d'autres attaques. Il faut noter que la rouille se dépose à l'intérieur du béton, ou électrolyte, près de l'acier noyé et non sur sa surface. La réaction peut seulement revêtir cette forme, lorsqu'il y a carbonatation du béton et baisse de la valeur du pH à 10 ou au-dessous.

La valeur normale du pH du béton frais est supérieure ou égale à 12 (voir paragraphe 2.1). Dans ces conditions, les ions ferreux ne quittent pas la surface du métal noyé mais réagissent avec l'eau pour former un revêtement cohérent d'oxyde ferrique sur les parties anodiques, libérant des ions hydrogène dans l'électrolyte. Ce revêtement empêche une autre action électrolytique et corrosion. Ce processus est connu sous le nom de passivation.

On peut observer qu'un béton poreux, de faible résistance, entourant une armature ou tout autre acier, n'assure pas une protection à long terme contre la corrosion. La carbonatation d'un tel béton sera rapide, supprimant la protection alcaline. Cela s'étant produit, ce béton permettra à l'eau et à l'oxygène de pénétrer, ce qui accélérera le processus de corrosion. La meilleure protection d'une armature ou d'un acier noyé contre la corrosion consiste à la recouvrir d'un béton résistant et compact.

3.3.3. Routes

Il faut se méfier des épandages de sel sur les routes enneigées, ce sel pouvant s'écouler vers le béton des barrages insuffisamment protégés. Des détériorations sérieuses ont été observées au barrage du Lac Piedmont, aux États-Unis (Annexe A).

3.3.4. Galeries non ventilées

Un manque d'air dans des galeries peut favoriser l'attaque par les acides par suite d'accumulation d'hydrogène sulfuré (ou acide sulfhydrique), parfois accélérée par l'action des bactéries (paragraphe 2.5. et exemples donnés dans l'Annexe A).

3.3.5. Puisards et drains de décompression

Si l'eau de lessivage contenant des carbonates ou des bicarbonates est évacuée dans un puisard ou dans un drain, elle peut dégager de l'anhydride carbonique avec dépôt de carbonates (paragraphe 2.1.). Il en résulte un colmatage du drain ou de la pompe (paragraphe 5.2, 5.3, 6.6, 8.5).

It should be noted that the corrosion of steel embedded in concrete is an electrolytic process with the concrete and any contained water, salts and oxygen, acting as the electrolyte. Variations in the surface properties of the steel, due to impurities or mill scale, cause local electrolytic cells to develop. Iron is dissolved from anodic regions and electrons released to cathodic areas where they combine with hydrogen and oxygen to form hydroxyl ions. The ferrous ions released at the anodes then combine with the hydroxyl ions to form ferrous hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) which, in the presence of any free oxygen is in turn converted into ferric oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) or rust. The corrosion products occupy a substantially greater volume than that of the steel removed. This generates high local bursting pressures on the concrete, causing disruption and exposing the steel to further attack. It should be noted that the deposition of the rust takes place within the concrete, or electrolyte, adjacent to the embedded steel and not on the surface of the steel. The reaction can only take place in this form when the concrete has carbonated and the pH value dropped to 10 or below.

The normal pH value of fresh concrete is 12 or more, see Section 2.1. Under such circumstances the ferrous ions do not leave the surface of the embedded metal but react with water to form a coherent coating of ferric oxide over the anodic regions, releasing hydrogen ions into the electrolyte. The coating prevents further electrolytic action and corrosion. This process is known as passivation.

It can be seen that weak, porous concrete around any embedded reinforcement or other steel part will not afford any long term protection against corrosion. Carbonation of weak concrete will be rapid, removing the alkaline protection. Once this has occurred, weak porous concrete will allow relatively easy access to water and oxygen which will in turn accelerate the corrosion process. The best protection against corrosion of reinforcement or embedded steel is to provide an adequate cover of sound dense concrete.

3.3.3. Highways

Care should be taken where highway de-icing salts may drain onto unprotected dam concrete. Significant attack from this cause is recorded at the Piedmont Lake dam, USA, see Appendix A.

3.3.4. Unventilated Galleries

Unventilated conditions in galleries can lead to acid attack via hydrogen sulphide build-up, sometimes assisted by the action of bacteria, see Section 2.5 and case histories in Appendix A.

3.3.5. Pump Sumps and Relief Drains

Where leached water containing dissolved carbonates or bicarbonates is released into a drainage sump or drain, carbon dioxide may be released depositing out carbonates, see Section 2.1. This in turn will tend to block the drain and/or pump, see Sections 5.2, 5.3, 6.6 and 8.5.

3.3.6. Végétation

Les surfaces inclinées et humides, à l'abri du soleil, sont parfois envahies par la mousse et le lichen, dans certains milieux. Ces végétaux s'accrochent en particulier sur une surface rugueuse et poreuse, et risquent de provoquer des désordres superficiels graves lorsqu'ils sont arrachés (paragraphe 2.6).

3.3.6. Plant Growth

Damp and sloping surfaces protected from sunlight may be vulnerable to moss and lichen growth in some environments. Such growth will take hold particularly on rough and porous surfaces and removal can cause significant surface disruption, see Section 2.6.

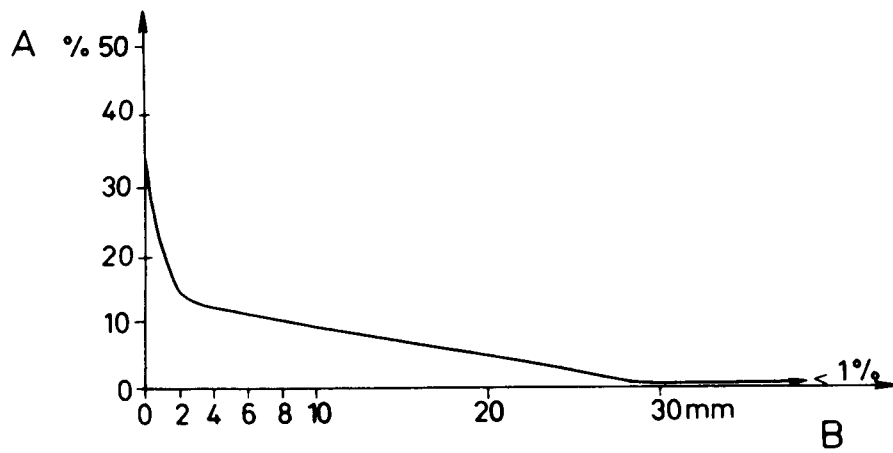


Fig. 1

Degree of leaching at different distances from a leaking crack determined by chemical analysis of concrete in a drill core.

Lessivage à différentes distances d'une fissure présentant des fuites, déterminé par analyse chimique de carottes de béton.

- (A) Loss of lime, % of original lime content. (A) *Poids de chaux perdue, % de la teneur initiale.*
 (B) Distance from crack, mm. (B) *Distance de la fissure, mm.*

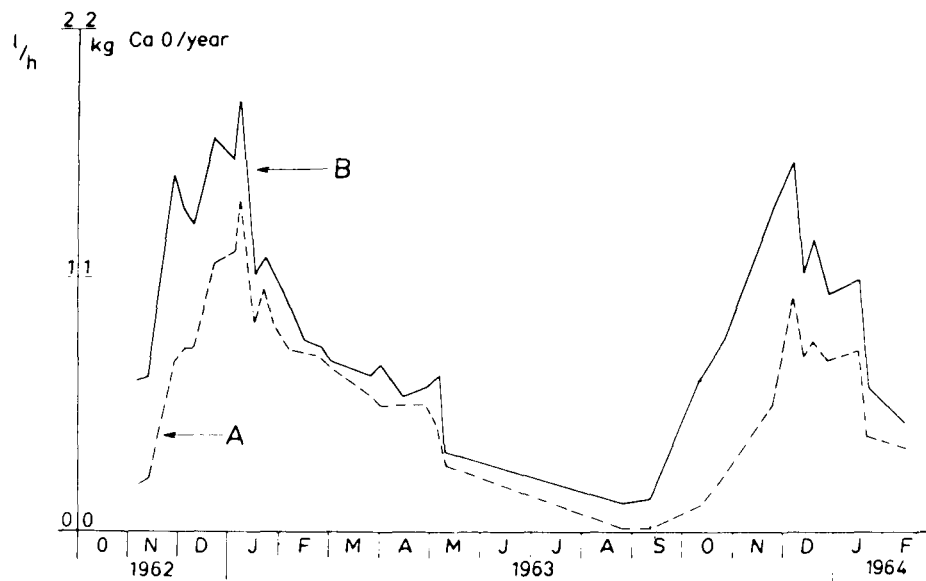


Fig. 2

Rate of leaking (A) and leaching (B) at a construction joint,
varying with annual temperature
and hence joint dilation.

*Fuites (A) et lessivage (B) dans un joint de construction,
influence des variations saisonnières de température
et d'ouverture du joint en résultant.*

4. ANALYSES DE L'EAU

Pour prévoir le risque d'attaque ou les raisons de celle-ci, après coup, la meilleure source d'informations reste l'analyse de l'eau locale. Une analyse complète exige, bien sûr, les services d'un analyste qualifié, mais l'ingénieur devra posséder des connaissances suffisantes des phénomènes pour lui permettre de préciser les informations recherchées et d'en interpréter les résultats. Les chapitres suivants traitent de ces analyses et de l'interprétation des résultats, notamment en relation avec l'agression par les agents extérieurs.

4.1. CRITÈRES DE BASE - DÉFINITIONS

L'eau naturelle renferme différents composés associant les cations de calcium, magnésium, sodium,... aux anions de bicarbonate, sulfate, chlorure, nitrate,... Le procès-verbal d'analyse se borne à préciser la teneur totale en ions. Par exemple, le calcium y figure sous la rubrique de « calcium total » sans distinction de forme (bicarbonate, chlorure, sulfate, etc.).

Outre la teneur ionique, les informations suivantes concernant l'agressivité de l'eau vis-à-vis du béton sont utiles à l'ingénieur :

- pH;
- alcalinité ou acidité;
- dureté;
- gaz dissous (anhydride carbonique,...);
- teneur totale en matières solides dissoutes;
- indice de saturation;
- température au moment de l'essai;
- conductivité électrique.

4.1.1. Teneur en ions

La teneur en différents anions et cations est exprimée généralement en milligrammes par litre (mg/l) — même valeur numérique que parties par million (ppm) — ou en équivalent de milligrammes par litre (e.mg/l). Pour les composés de calcium et de magnésium, l'anhydride carbonique dissous et l'alcalinité, on utilise également l'équivalent de carbonate de calcium (e.CaCO₃).

Un exemple d'analyse de la teneur ionique est donné dans le Tableau A. Les coefficients nécessaires pour passer de mg/l à e.mg/l (et réciproquement) figurent dans le Tableau B, et pour passer de mg/l à e.CaCO₃ (mg/l), dans le Tableau C. Les notas en bas du Tableau A sont à lire attentivement.

4.1.2. pH

La valeur du pH correspond au logarithme négatif de la teneur en ions d'hydrogène. Pour l'eau pure, le pH est de 7. Une valeur inférieure indique un milieu

4. WATER ANALYSES

The most useful source of information on the likelihood of attack, or the reasons for attack which has already taken place, will be provided by analyses of local water. Full chemical analyses will of course require a qualified analyst, however, the Engineer should be sufficiently knowledgeable about what is involved in order to be able to request the appropriate data and interpret the results. The following sections deal in basic terms with such analyses and their interpretation with particular regard to aggressive attack.

4.1. BASIC REQUIREMENTS AND DEFINITIONS

Natural waters will contain a variety of compounds formed from cations such as calcium, magnesium and sodium combining with anions such as bicarbonate, sulphate, chloride and nitrate. An analyst's report will only give such total ionic contents. For example, calcium will be given as total calcium regardless of whether it is present as a bicarbonate, chloride, sulphate, etc.

In addition to ionic content, the Engineer considering aggression to concrete would be interested in the following :

- pH
- Alkalinity or acidity
- Hardness
- Dissolved gases such as carbon dioxide
- Total dissolved solids
- Saturation index
- Temperature at time of test
- Electrical conductivity

4.1.1. Ion Content

The concentrations of the individual anions and cations in the water are normally reported as either milligrams per litre (mg/l), which is the same as parts per million (ppm), or equivalent milligrams per litre (e.mg/l). Calcium and magnesium compounds, dissolved carbon dioxide and alkalinity may also be reported as equivalent calcium carbonate (e.CaCO₃)

The results of a typical analysis of ion content could therefore be as shown on Table A. Conversion factors for mg/l and e.mg/l are given in Table B and conversion factors for mg/l and e.CaCO₃ are given in Table C. Particular attention should be given to the notes included as part of Table A.

4.1.2. pH

The pH value is the negative logarithm of the concentration of hydrogen ions. Pure water has a pH value of 7.0, a lower value indicating an acid environment, a

acide, une valeur supérieure un milieu alcalin. Comme il a été dit au paragraphe 3.2.1., une solution saturée d'acide humique présente un pH de 3,6 à 4,1, mais sa solubilité dans l'eau est faible. Le produit de l'attaque du béton est l'humate de calcium, quasi insoluble; ainsi, malgré son pH faible, cet acide est peu dangereux généralement. Par contre, si la réduction de la valeur du pH est due à la présence d'anhydride carbonique en solution, alors, pour les raisons données au paragraphe 2.1. ci-dessus, l'attaque sera vraisemblablement plus grave, malgré un pH de l'ordre de 5,5. Un pH inférieur à 4 indique, en général, la présence d'acides minéraux à l'état libre donnant une eau agressive.

En conclusion, on voit que la valeur du pH n'est pas, à elle seule, un critère fiable de l'agressivité de l'eau.

4.1.3. Alcalinité ou acidité

L'alcalinité mesure la capacité de l'eau à neutraliser les acides; l'acidité mesure la capacité de l'eau à neutraliser les alcalis. Ces paramètres sont mesurés par le titrage à l'aide d'indicateurs classiques tels que le méthylorange.

L'alcalinité est exprimée en termes de bicarbonate, l'unité de mesure étant le mg/l d'équivalent de carbonate de calcium. S'il s'agit de la teneur en bicarbonates de calcium et de magnésium, c'est une mesure de la dureté temporaire; parfois, on appelle cette caractéristique « l'alcalinité vis-à-vis du méthylorange ». Dans ce cas, l'alcalinité supplémentaire due à la présence de l'hydrate de sodium est appelée « alcalinité caustique ». Il n'y a aucune corrélation entre l'alcalinité et le pH.

4.1.4. Dureté

La dureté temporaire est attribuée aux bicarbonates de magnésium et de calcium (voir paragraphe 4.1.3. ci-dessus) et est éliminée par ébullition. On l'appelle également « dureté due aux carbonates ».

La dureté permanente n'est pas affectée par l'ébullition et est attribuable essentiellement aux sulfates et aux chlorures de calcium et de magnésium. On l'appelle également « dureté due aux sulfates ou aux non-carbonates ».

La dureté totale sera la somme des duretés temporaire et permanente; on peut l'appeler « dureté due au calcium ou au magnésium » (en tenant compte des seuls cations). Ces trois duretés sont exprimées en équivalent de carbonate de calcium (mg/l).

4.1.5. Anhydride carbonique dissous

Normalement, l'anhydride carbonique est présent dans l'eau sous forme de bicarbonate de calcium, ayant réagi avec le carbonate de calcium disponible pour former le bicarbonate. L'excédent éventuel d'anhydride carbonique dissous dans l'eau est ainsi disponible pour se combiner avec tout nouvel apport de carbonate de calcium; pour cette raison, on parle d'anhydride carbonique agressif (voir aussi paragraphe 2.1). En l'absence d'acides spécifiques, c'est essentiellement à l'anhydride carbonique dissous qu'est attribuée l'acidité éventuelle de l'eau. Il faut être prudent lors de la mesure de la teneur en anhydride carbonique dissous (voir paragraphe 4.4) et l'utilité de cette mesure, associée à celle de la dureté temporaire, pour l'appréciation de l'agressivité, est limitée (voir paragraphe 4.2.1.).

higher value an alkaline one. As mentioned in Section 3.2.1., a saturated solution of humic acid has a pH of 3.6 to 4.1 but has a low solubility in water. The product of attack on concrete is the virtually insoluble calcium humate, hence, in spite of the low pH, humic acid attack is generally not serious. Where, on the other hand, the low pH is due to dissolved carbon dioxide, for the reasons given in Section 2.1 the attack is likely to be more serious although the pH value will generally be in the order of 5.5. A pH value below 4 generally denotes the presence of free mineral acids and the water will be aggressive.

It can be seen from the above that the pH value alone does not give a good indication of aggressivity.

4.1.3. Alkalinity or Acidity

Alkalinity is defined as the capacity of the water for neutralizing acid, acidity is defined as its capacity for neutralizing alkali. These parameters are determined by titration using standard indicators such as Methyl Orange.

Alkalinity is reported in terms of bicarbonate expressed as equivalent calcium carbonate (mg/l). Where it represents the amounts of calcium and magnesium bicarbonates present it is a measure of temporary hardness and is sometimes referred to as the Alkalinity to Methyl Orange (MO). Additional alkalinity due to the presence of sodium hydroxide is referred to as caustic alkalinity. There is no correlation between alkalinity and pH.

4.1.4. Hardness

Temporary hardness is attributed to calcium and magnesium bicarbonate, see Section 4.1.3., and can be removed by boiling. It is also known as the carbonate hardness.

Permanent hardness cannot be removed by boiling and is primarily attributable to sulphates and chlorides of calcium and magnesium. It is also known as the sulphate or non-carbonate hardness.

Total hardness would be the sum of temporary and permanent hardnesses and may be termed calcium or magnesium hardness, that is by considering only the cations. All three types of hardness are generally expressed in terms of equivalent calcium carbonate (mg/l).

4.1.5. Dissolved Carbon Dioxide

Carbon dioxide is usually present in water as calcium bicarbonate, having combined with any available calcium carbonate to form the bicarbonate. Any excess carbon dioxide dissolved in the water is therefore freely available to dissolve more calcium carbonate and this is termed aggressive carbon dioxide, see also Section 2.1. In the absence of specific acids, dissolved carbon dioxide is the main cause of acidity of water. Care has to be taken when measuring dissolved carbon dioxide, see Section 4.4, and its use in assessing aggressivity in conjunction with temporary hardness is limited, see Section 4.2.1.

4.1.6. Teneur totale en matières solides dissoutes

Il s'agit de la totalité des matières solides laissées après l'évaporation de l'échantillon. La teneur sera voisine de la teneur totale en anions et cations, exprimée en mg/l (voir tableau A).

4.1.7. Indice de saturation

Voir paragraphe 4.2.3. ci-dessous. C'est un moyen complet d'apprécier l'agressivité d'une eau et le potentiel de lessivage par l' « eau douce ».

4.1.8. Température

L'indication de la température au moment de l'essai est nécessaire pour juger du niveau d'agressivité, puisque certaines réactions chimiques sont sensibles aux températures (voir paragraphe 4.2.3).

4.1.9. Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'eau peut être mesurée rapidement et facilement; en général, elle est traduite en micromhos/cm³ à 20 °C. Une conductivité élevée correspondra à une teneur importante en ions ou en matières solides dissoutes. La conductivité électrique ne peut être employée en elle-même, comme mesure de l'agressivité, mais elle peut être un complément utile pour des études plus poussées. Elle peut être utilisée n'importe où et est une méthode appropriée pour détecter rapidement les changements de la teneur en ions, mais elle ne doit pas l'être pour remplacer des études périodiques plus complètes.

4.2. ÉVALUATION DE L'AGRESSIVITÉ DUE AU LESSIVAGE PAR L'EAU DOUCE

Il existe trois méthodes permettant d'établir si l'eau risque d'éliminer le calcium du béton par lessivage :

- étude de la teneur en anhydride carbonique dissous et de la dureté temporaire;
- exécution d'un essai simple;
- calcul, à partir d'une analyse chimique, de l'indice de saturation.

La valeur de la première méthode est limitée. La dernière constitue l'approche la plus complète et elle est à recommander dans la plupart des cas. Ces trois méthodes sont précisées ci-dessous.

4.2.1. Anhydride carbonique dissous

Comme il est dit au paragraphe 4.1.5., si la quantité d'anhydride carbonique dissous est supérieure à celle nécessaire à l'équilibre carbonate-bicarbonate, cet anhydride carbonique peut continuer à dissoudre le carbonate de calcium. Ainsi, la comparaison entre la teneur totale en anhydride carbonique dissous et la dureté temporaire (exprimée en équivalent de carbonate de calcium) indique si l'agression est probable ou non. Les précisions suivantes sont données par Lea [5] :

4.1.6. Total Dissolved Solids

This is the total solid content left after evaporation and will approximate closely to the total anion and cation content of the sample expressed as mg/l, see Table A.

4.1.7. Saturation Index

This is dealt with in Section 4.2.3 and represents a complete way of assessing the aggressivity of water and its potential for “ soft water ” leaching.

4.1.8. Temperature

A record of temperature is necessary in assessing the degree of aggressivity as some of the reactions involved are temperature sensitive, see Section 4.2.3.

4.1.9. Electrical Conductivity

The electrical conductivity of water is quick and easy to measure and is generally quoted in micromhos/cm³ at 20 °C. A high conductivity will correspond to a high ionic, or dissolved solids content. Electrical conductivity cannot, in itself, be used as a measure of aggression but can be a useful supplement to more detailed analyses. In any given location it may be used as a convenient way of rapidly detecting changes in ionic content but should not be used to replace periodic, more comprehensive analyses.

4.2. ASSESSING AGGRESSIVITY DUE TO SOFT WATER LEACHING

There are three basic approaches to assessing whether or not a water is likely to leach calcium from concrete; these are by considering the dissolved carbon dioxide content in conjunction with the temporary hardness, by carrying out a simple test or by calculating the saturation index from a chemical analysis. The first has only a limited value while the last represents the most complete approach and is recommended as the most generally applicable. All three are discussed briefly below.

4.2.1. Dissolved Carbon Dioxide

As mentioned in Section 4.1.5, where dissolved carbon dioxide is present in excess of that required by the carbonate-bicarbonate equilibrium, it will be free to dissolve more calcium carbonate. A comparison between total dissolved carbon dioxide and temporary hardness expressed as equivalent calcium carbonate will therefore indicate whether or not aggression is likely. The following guidance is provided by Lea [5] :

Dureté temporaire e.CaCO ₃ (mg/l)	CO ₂ libre nécessaire pour des conditions agressives (mg/l)
> 40 à 50	> 50
10 à 20	> 10
5	> 5
2,5	négligeable

Cet auteur note que pour un pH de 7 ou de 7,5, l'eau peut être agressive si la dureté temporaire est inférieure à 2,5 e. CaCO₃ (mg/l).

Cette approche reste d'une utilité limitée puisqu'elle ne concerne que les eaux très pures contenant peu de sels autres que le bicarbonate de calcium. De plus, la technique d'échantillonnage doit être très soignée afin d'éliminer les erreurs dans la mesure de l'anhydride carbonique dissous (voir paragraphe 4.4).

4.2.2. Essai simple

Van Aardt et Fulton [8] donnent un essai simple de l'agressivité des eaux pures :

a) Détermination du pH ou de l'alcalinité d'un échantillon de l'eau à contrôler.

b) Dans une portion de l'échantillon, addition d'une quantité en excès de précipité de carbonate de calcium, chimiquement pur, et lavé (une cuillerée à café pour 150 ml). Remuer pendant quelques minutes, laisser reposer, filtrer. Détermination du pH ou de l'alcalinité, comme dans *a)*. Comparer les résultats *a)* et *b)*.

Si *b)* est inférieur à *a)*, l'eau est déjà sursaturée de carbonate de calcium.

Si *b)* est égal à *a)*, l'eau est en équilibre chimique en ce qui concerne le carbonate de calcium.

Si *b)* est supérieur à *a)*, l'eau n'est pas saturée de carbonate de calcium et a donc dissous davantage; elle présente donc un potentiel d'agressivité.

4.2.3. Indice de saturation ou indice Langelier

Un indice de saturation a été mis au point par Langelier dès 1936. Il considère la dureté, l'alcalinité, le pH, la température et la teneur totale en matières solides dans une approche globale, permettant d'évaluer l'agressivité de l'eau. Cet indice est souvent appelé « indice Langelier ». Son utilisation est décrite en détail par Muller [16] et par Van Aardt et Fulton [8], mais un algorithme, d'une utilisation plus commode pour le calcul de l'indice, fut proposé en 1977 par Morton [17], au moyen de la relation :

$$IL = \text{pH} + \log C + \log A + 0,025 T - 0,011 S^{1/2} - 12,30$$

IL = Indice Langelier

pH = Valeur du pH

C = Dureté due au calcium ou teneur en ions calciques, exprimée en e.CaCO₃ (mg/l)

A = Alcalinité (déterminée à l'aide du méthylorange comme indicateur), exprimée en e.CaCO₃ (mg/l)

T = Température en °C (T étant comprise entre 0 et 25 °C)

S = Teneur totale en matières solides dissoutes (mg/l) (S étant inférieure à 1 000 mg/l)

Temporary Hardness e.CaCO ₃ (mg/l)	Free CO ₂ required for Aggressive Conditions (mg/l)
> 40 to 50	> 50
10 to 20	> 10
5	> 5
2.5	negligible CO ₂

He notes that waters with a pH of 7 or 7.5 may be aggressive if the temporary hardness is less than 2.5 e.CaCO₃ (mg/l).

The above approach has only limited use as it relates to very pure waters with negligible salts other than calcium bicarbonate. Furthermore great care needs to be taken with sampling technique in order to accurately measure dissolved carbon dioxide, see Section 4.4.

4.2.2. Simple Testing

A simple test aggression of soft waters is quoted by Van Aardt and Fulton [8] as follows :

a) Determine pH or alkalinity of a water sample.

b) To a portion of the sample add chemically pure washed precipitated calcium carbonate in excess (1 teaspoonful to 150 ml). Stir for a few minutes, leave to settle and then filter. Determine pH or alkalinity as in *a)*. Compare the alkalinity or pH of *b)* with *a)*.

If *b)* is less than *a)* the water is already supersaturated with calcium carbonate.

If *b)* equals *a)* the water is chemically balanced with respect to calcium carbonate.

If *b)* is greater than *a)* the water was not saturated with calcium carbonate and has therefore dissolved more, hence it is potentially aggressive.

4.2.3. Saturation or Langelier Index

A saturation index was developed by Langelier as long ago as 1936. It considers hardness, alkalinity, pH, temperature and total solids in an all embracing approach to assessing the aggressivity of water. It is often referred to as the Langelier Index. Its use is reported in detail by Muller [16] and by Van Aardt and Fulton [8], though a more readily usable algorithm for calculating the Langelier index was proposed in 1977 by Morton [17] who derived the expression :

$$LI = pH + \log C + \log A + 0.025 T - 0.011 S^{1/2} - 12.30$$

where :

LI = Langelier Index

pH = pH value

C = Calcium hardness or calcium ion content expressed as e.CaCO₃ (mg/l)

A = Alkalinity (using Methyl Orange as an indicator) expressed as e.CaCO₃ (mg/l)

T = Temperature in °C where T lies between 0 and 25 °C

S = Total dissolved solids (mg/l) where S is less than 1 000 mg/l

Une valeur négative de l'indice IL indique que l'eau est agressive. Au-dessous d'environ $-1,5$, elle est très agressive. Dans ce cas, le béton sera attaqué. Une valeur positive de IL indique la possibilité de dépôts de calcium. On notera que l'agressivité augmente quand la température diminue.

Le Tableau D résume les résultats de deux analyses faites sur un grand barrage-voûte, avec calcul de l'indice Langelier. L'échantillon (A) correspond à l'eau brute de la retenue, qui s'avère agressive (ces données ont servi à l'établissement du Tableau A). L'indice Langelier est de $-2,62$. L'analyse (B) concerne la même eau, mais l'échantillon provient d'une galerie de drainage, l'eau ayant percolé à travers le voile d'étanchéité. On remarque une augmentation sensible des teneurs en ions de calcium, de magnésium et en bicarbonates, la teneur totale en matières solides passant de 130 mg/l à 540 mg/l . On en déduit une vitesse de dissolution de 410 mg/l , intervenue soit dans la fondation, soit, plus vraisemblablement, dans le voile d'étanchéité. Dans ce Tableau, on voit également qu'il en résulte une diminution importante de l'agressivité, l'indice Langelier passant de $-2,62$ à $-0,31$.

4.3. SULFATES

Les différents types d'attaque par les sulfates sont précisés dans le paragraphe 2.2. Il est établi que, pour être précis, l'agression par les sulfates n'est pas liée seulement à la teneur en ions de sulfates (SO_4) mais également aux cations associés.

Cela peut expliquer les discordances dans les normes établies par différents pays et organismes où les critères sont généralement exprimés par rapport aux seuls ions de sulfate (voir paragraphe 4.5). La teneur en sulfates peut s'exprimer, soit selon la quantité de SO_4 présente, soit sous forme d'équivalent anhydride sulfurique (SO_3); pour passer du SO_4 (en mg/l) au SO_3 , on applique un coefficient de $0,833$.

Il est à noter que la teneur en sulfates obtenue varie selon qu'il s'agit d'un échantillon de sol, d'eau de nappe, ou d'un mélange des deux. Pour plus de précisions, il faut consulter les normes en vigueur localement. Il est à noter également que la détermination de la teneur en sulfates exige un soin particulier (paragraphe 4.4.).

4.4. TECHNIQUE DE PRISE D'ÉCHANTILLONS

Il convient de consulter un spécialiste pour les prises d'échantillons. Par exemple, en l'absence d'une étanchéité parfaite de l'échantillon, des gaz dissous (anhydride carbonique,...) risquent de s'échapper, ce qui fausse les déterminations du pH.

Il faut également prendre soin de la mesure des ions particuliers (sulfates,...). Van Aardt et Fulton [8] citent le cas d'une retenue dont l'eau renfermait $11\,000 \text{ mg/l}$ de sulfates tandis que des forages, non loin de là, ne présentaient que 140 à 530 mg/l de sulfates et 360 à $1\,520 \text{ mg/l}$ de chlorures. Ailleurs, la situation était inversée. En outre, ces auteurs soulignent que la zone superficielle du sol (1 à 2 m) peut présenter une faible teneur en ions par suite du lessivage, et le Centre d'Études du Bâtiment Britannique [18] attire l'attention sur le risque de dilution des eaux de la nappe dans les eaux superficielles lors des opérations d'échantillonnage.

A negative value of LI indicates that the water is aggressive, with values more negative than about -1.5 being very aggressive. In these circumstances concrete will be corroded. A positive value for LI implies the likelihood of deposition of calcium. It should be noted that aggressivity increases as temperature decreases.

Table D shows two analyses made at a major arch dam in which the Langelier Index has been calculated. Analysis (A) represents raw reservoir water which can be seen to be aggressive and in fact is the actual analysis on which Table A was based. The water has a Langelier index of -2.62 . Analysis (B) is an analysis of water from the same dam but collected from one of the drainage galleries, after the reservoir water had percolated through the grout curtain. It can be seen that the calcium, magnesium and bicarbonate ion contents have all shown marked increases with total solids dissolved rising from 130 mg/l to 540 mg/l. This implies a rate of dissolution of 410 mg/l of either the foundation material or, more probably, the grout curtain. It can also be seen that the effect of this has been to greatly reduce the aggressivity of the water with the Langelier Index changing from -2.62 to -0.31 .

4.3. SULPHATES

The various types of sulphate attack are discussed in Section 2.2. It is apparent from this that, strictly, aggression due to sulphate attack does not depend on the concentration of sulphate ion (SO_4) alone but on the cation with which it is associated. This may account for the variation in aggression standards between countries and bodies where criteria are generally expressed in terms of sulphate ion only, see Section 4.5. Sulphate content can be expressed as SO_4 or equivalent sulphur trioxide (SO_3). Sulphate (SO_4) in mg/l may be converted to equivalent sulphur trioxide (SO_3) by multiplying by 0.833 .

It should be noted that the concentration of sulphates obtained will vary depending on whether the sample is soil, groundwater or a mixed water/soil extract. Local codes should be consulted for additional guidance, where these are available. It should also be noted that care is needed when sampling for sulphates, see Section 4.4.

4.4. SAMPLING TECHNIQUE

Specialist advice should be sought before samples are taken. For example, unless the sample is adequately sealed, dissolved gases such as carbon dioxide may be lost and this in turn may distort any subsequent pH measurements.

Care also has to be taken when sampling for specific ions such as sulphates. Van Aardt and Fulton [8] quote the case of a reservoir with water containing $11\,000$ mg/l of sulphates whereas nearby boreholes showed concentrations of only 140 to 530 mg/l for sulphates and 360 to $1\,520$ mg/l for chlorides. In other areas the reverse was true. They also stress that the upper 1 to 2 metres of soil may indicate low ion concentrations due to leaching. Building Research Establishment Digest 250 [18] points to the dangers of diluting groundwater with surface water while sampling.

Van Aardt et Fulton font remarquer que, si la classification de l'agressivité est basée uniquement sur les analyses de nappe, il ne faut retenir que les valeurs les plus élevées obtenues. En cas de classification basée sur un nombre réduit d'échantillons, il faut procéder à un complément de mesures en cas de dispersion importante dans les résultats. Si les résultats disponibles sont abondants, on retient, pour la classification, les 20 % présentant les valeurs les plus élevées. Mais en cas de mélanges des échantillons avant analyse, on retient les 10 % les plus élevés.

Dans le cas de retenues existantes, les caractéristiques de l'eau peuvent éventuellement changer de façon appréciable soit chaque année [19] à cause des variations saisonnières normales, ou aux époques de grandes crues et durant la mise en eau initiale lorsque de grandes quantités de végétation en décomposition peuvent affecter la qualité de l'eau. La qualité peut également varier avec la profondeur du fait des courants température/densité. La fréquence et la localisation des prélèvements d'échantillons doivent être choisies pour tenir compte de ces conditions avec la nécessité de prélever des échantillons initiaux fréquents jusqu'à ce que les caractéristiques d'une retenue donnée soient bien déterminées. Le prélèvement initial d'échantillons aura lieu au moins tous les mois et peut-être, suivant les circonstances, toutes les semaines. Il est également recommandé de prélever des échantillons régulièrement, non seulement dans l'eau des retenues, mais également dans les eaux de drainage ou de percolation du barrage — voir paragraphe 7.5.

Lorsque des prises d'échantillons d'eau de percolation sont effectuées à partir de drains ou de forages, les drains avec écoulement et également ceux sans écoulement doivent faire l'objet de prélèvements. Les drains qui ne coulent pas peuvent contenir de l'eau ancienne dans laquelle des teneurs exceptionnellement élevées en matières solides dissoutes se sont accumulées.

4.5. CLASSIFICATION DES NIVEAUX D'AGRESSIVITÉ

Le moyen le plus sûr pour apprécier l'agressivité due à l'eau douce reste le calcul de l'indice de saturation (voir chapitre 4.2.3 ci-dessus). Pour l'appréciation de l'agressivité due à la présence d'ions particuliers ou d'anhydride carbonique en solution, il convient de se reporter aux normes en vigueur localement, relatives aux conditions locales et aux matériaux. Une liste de documents (normes, monographies, etc.) concernant cette question a été établie essentiellement à partir des réponses au questionnaire diffusé et figure dans l'Annexe B.

Le Tableau E est cité par Muller [16]. Il présente des exemples intéressants d'enveloppes préconisées dans différents pays pour caractériser les niveaux d'agressivité, valeurs en vigueur lors de la rédaction de l'article de Muller (1975).

Les Tableaux F et G donnent deux exemples de classement de l'agressivité due aux sulfates (ainsi que les caractéristiques des ciments résistant à l'agression), actuellement utilisés respectivement au Royaume-Uni et aux États-Unis.

La plus récente Norme Européenne relative aux agents agressifs présents dans l'environnement est la Norme Française P 18-011 de mai 1985. Les Tableaux H et I sont extraits de cette norme. Celle-ci présente une introduction très intéressante contenant une remarque que tous ceux concernés par ce problème devront bien noter :

« Ce document donne la définition des classes d'agressivité des milieux

Van Aardt and Fulton comment that where aggressive classification is based solely on ground water analysis, the highest values obtained should be taken for classification purposes. Where classification is based solely on the analysis of a small number of samples, additional readings should be taken if the results vary significantly. If a large number of results are available the classification should be based on the highest 20 percent of results. Where the samples have been combined before analysis the highest 10 percent should be adopted.

In the case of existing reservoirs, water characteristics may change by an appreciable degree either annually [19], due to normal seasonable fluctuations, at times of heavy floods and also during initial impounding, when large quantities of degrading vegetable matter may affect water quality. Quality may also change with depth due to temperature/density currents. The frequency and location of sampling should be chosen to reflect these possibilities with, clearly, the need for more frequent initial sampling, until the characteristics of a particular reservoir have been established. Initial sampling should take place at least monthly and perhaps weekly under some circumstances. It is also advisable to periodically sample not only the reservoir water but also the associated dam seepage or drainage water, see Section 7.5.

Where sampling of seepage water is carried out from drains or boreholes, both flowing and non-flowing drains should be sampled. Non-flowing drains may contain ancient water in which unusually high concentrations of dissolved solids have accumulated.

4.4. AGGRESSION LEVEL CLASSIFICATION

As mentioned earlier, aggression due to soft water leaching is best assessed by calculating the saturation index see Section 4.2.3. Assessing likely aggression due to specific ionic or dissolved carbon dioxide concentrations is best attempted by consulting relevant local standards or codes which will reflect local conditions and materials. A representative list of relevant standards and references is given in Appendix B and was largely assembled from questionnaire replies.

Table E is quoted by Muller [16] and taken from a BRE translation. It presents useful comparative ranges of aggression levels from various countries as at 1975.

Tables F and G are current examples of sulphate classification, together with associated cement requirements, from the UK and USA respectively.

The most recent European standard on aggressive environmental agents is French Standard P 18-011, dated May 1985. Tables H and I are taken from this standard. It has a particularly interesting introduction, concluding with a comment which anybody considering the subject should note well :

“ This document includes the definition of categories of aggressiveness of

environnant le béton, ainsi que les mesures préventives recommandées, au niveau de la confection du béton, pour lui assurer une bonne qualité.

Les publications étrangères ainsi que les travaux européens et internationaux ont été pris en considération lors de l'établissement de ce document, dont l'intérêt est reconnu, bien que les valeurs limites choisies restent très discutées entre experts ».

environmental conditions affecting concrete, together with recommended precautionary measures with regard to the preparation of concrete in order to ensure its durability.

Foreign publications and European and international operations were taken into consideration when drawing up this document, the significance of which is acknowledged, although the limiting values selected remain much disputed among experts. ”

Tableau A. — Résultats d'une analyse ionique type, exprimés en mg/l, e.mg/l et e·CaCO₃ (mg/l).

Ion	mg/l	e·mg/l	e·CaCO ₃ (mg/l)
Calcium	20,020	0,999	50,050
Magnésium	2,190	0,180	8,975
Sodium	9,660	0,420	
Potassium	3,900	0,100	
Fer	1,000	0,036	
Total des cations		1,735	
Chlorure	21,500	0,606	
Sulfate	0,960	0,020	
Nitrate	1,310	0,021	
Nitrite	0,030	0,001	
Bicarbonate	65,854	1,079	54,000
Total des anions		1,727	
Total des matières solides en solution	126,424		

Notes

1. 50,050 e·CaCO₃ (mg/l) correspond à la dureté due au calcium.
2. 8,975 e·CaCO₃ (mg/l) correspond à la dureté due au magnésium.
3. La dureté totale sera de 50,050 + 8,975 = 59,025 mg/l (sous forme de CaCO₃).
4. 54,000 e·CaCO₃ (mg/l) correspond à l'alcalinité (sous forme de CaCO₃).
5. Si l'analyse est exécutée convenablement, la teneur totale en cations doit être égale (ou presque égale) à la teneur totale en anions.
6. La valeur de 126,424 est théorique. La teneur totale réelle en matières solides en solution est à déterminer par évaporation et le résultat sera plus faible, les bicarbonates se transformant en carbonates.

Table A. — Results of a typical ion analysis expressed in terms of mg/l, e·mg/l and e·CaCO₃ (mg/l)

Ion	mg/l	e·mg/l	e·CaCO ₃ (mg/l)
Calcium	20.020	0.999	50.050
Magnesium	2.190	0.180	8.975
Sodium	9.660	0.420	
Potassium	3.900	0.100	
Iron	1.000	0.036	
Total cations		1.735	
Chloride	21.500	0.606	
Sulphate	0.960	0.020	
Nitrate	1.310	0.021	
Nitrite	0.030	0.001	
Bicarbonate	65.854	1.079	54.000
Total anions		1.727	
Total dissolved solids	126.424		

Nota

1. 50.050 e·CaCO₃ (mg/l) represents calcium hardness.
2. 8.975 e·CaCO₃ (mg/l) represents magnesium hardness.
3. Total hardness would be 50.050 + 8.975 = 59.025 mg/l (as CaCO₃).
4. 54.000 e·CaCO₃ (mg/l) represents the alkalinity as CaCO₃.
5. Total cations should equal (or nearly equal) total anions if the analysis has been carried out competently.
6. 126.424 is a theoretical figure. The actual total solids will be determined by evaporation and the result should be lower as bicarbonates convert to carbonates.

Table B. — Conversion factors between mg/l and e·mg/l.
 Tableau B. — Coefficients de conversion entre mg/l et e·mg/l.

Ion	e·mg/l to mg/l multiply by <i>Pour obtenir mg/l multiplier e·mg/l par</i>	mg/l to e·mg/l multiply by <i>Pour obtenir e·mg/l multiplier mg/l par</i>	Ion	e·mg/l to mg/l multiply by <i>Pour obtenir mg/l multiplier e·mg/l par</i>	mg/l to e·mg/l multiply by <i>Pour obtenir e·mg/l multiplier mg/l par</i>
Ca ⁺⁺	20.04	0.0499	HCO ₃ ⁻	61.02	0.0164
Mg ⁺⁺	12.16	0.0822	CO ₃ ⁻⁻	30.00	0.0333
Zn ⁺⁺	32.69	0.0306	OH ⁻	17.01	0.0588
Cu ⁺⁺	31.77	0.0315	SO ₄ ⁻	48.03	0.0208
Na ⁺	22.99	0.0435	SO ₃ ⁻⁻	40.03	0.0250
K ⁺	39.10	0.0256	S ⁻⁻	16.03	0.0624
H ⁺	1.008	0.9921	Cl ⁻	35.46	0.0282
NH ₄ ⁺	18.04	0.0554	NO ₃ ⁻	62.01	0.0161

Tableau C. — Coefficients de conversion de mg/l en e·CaCO₃ (mg/l).

Corps chimique	Pour obtenir e·CaCO ₃ (mg/l) multiplier mg/l par	Corps chimique	Pour obtenir e·CaCO ₃ (mg/l) multiplier mg/l par
Calcium	2,500	Magnésium	4,098
Bicarbonate de calcium	0,617	Bicarbonate de magnésium	0,683
Sulfate de calcium	0,734	Carbonate de magnésium	1,185
Chlorure de calcium	0,901	Sulfate de magnésium	0,831
Hydrate de calcium	1,350	Chlorure de magnésium	1,049
Oxyde de calcium	1,790	Oxyde de magnésium	2,480
HCO ₃	0,820	SO ₄	1,042
CO ₃	1,667	Cl	1,410

Table C. — Conversion factors for mg/l to e·CaCO₃ (mg/l).

Substance	mg/l to e·CaCO ₃ (mg/l) multiply by	Substance	mg/l to e·CaCO ₃ (mg/l) multiply by
Calcium	2.500	Magnesium	4.098
Calcium bicarbonate	0.617	Magnesium bicarbonate	0.683
Calcium sulphate	0.734	Magnesium carbonate	1.185
Calcium chloride	0.901	Magnesium sulphate	0.831
Calcium hydroxide	1.350	Magnesium chloride	1.049
Calcium oxide	1.790	Magnesium oxide	2.480
HCO ₃	0.820	SO ₄	1.042
CO ₃	1.667	Cl	1.410

Tableau D. — Analyses d'échantillons d'eau provenant de la retenue (A) et d'une galerie de drainage (B) d'un grand barrage-voûte.

Ion	Échantillon (A)		Échantillon (B)	
	mg/l	e · mg/l	mg/l	e · mg/l
Calcium	20,020	0,999	91,300	4,556
Magnésium	2,190	0,180	25,800	2,122
Sodium	9,660	0,420	5,290	0,230
Potassium	3,900	0,100	0,390	0,010
Fer	1,000	0,036	0,900	0,032
Total cations		1,736		6,950
Chlorure	21,500	0,606	9,000	0,254
Sulfate	0,960	0,020	4,800	0,100
Nitrate	1,310	0,021	1,000	0,016
Nitrite	0,030	0,001	0,700	0,015
Bicarbonate	65,854	1,079	400,000	6,555
Total anions		1,727		6,940
Calcium (e · CaCO ₃ , en mg/l)	50,050		228,250	
Alcalinité déterminée à l'aide du méthylorange (e · CaCO ₃ , en mg/l)	54,000		328,000	
Total de matières solides dissoutes (mg/l)	130,000		540,000	
pH	6,000		7,000	
Température en °C	15,000		15,000	
Indice Langelier	- 2,62		- 0,31	

Table D. — Analyses of water collected from (A) the reservoir
and (B) a drainage gallery at a major arch dam

Ion	Sample (A)		Sample (B)	
	mg/l	e · mg/l	mg/l	e · mg/l
Calcium	20.020	0.999	91.300	4.556
Magnesium	2.190	0.180	25.800	2.122
Sodium	9.660	0.420	5.290	0.230
Potassium	3.900	0.100	0.390	0.010
Iron	1.000	0.036	0.900	0.032
Total cations		1.736		6.950
Chloride	21.500	0.606	9.000	0.254
Sulphate	0.960	0.020	4.800	0.100
Nitrate	1.310	0.021	1.000	0.016
Nitrite	0.030	0.001	0.700	0.015
Bicarbonate	65.854	1.079	400.000	6.555
Total anions		1.727		6.940
Calcium (as e · CaCO ₃ in mg/l)	50.050		228.250	
Methyl Orange Alkalinity (as e · CaCO ₃ in mg/l)	54.000		328.000	
Total dissolved solids (mg/l)	130.000		540.000	
pH	6.000		7.000	
Temperature in °C	15.000		15.000	
Langelier Index	— 2.62		— 0.31	

Tableau E. — Niveaux d'agressivité de l'eau selon différentes normes nationales

Degré d'agressivité de l'eau	Modéré	Élevé	Très élevé	Excessif
Pays	Teneur en ions SO ₄ (mg/l) de l'eau			
Pologne	—	250- 500	—	> 500
Tchécoslovaquie (*)	100- 300	300- 800	> 800	—
Grande-Bretagne	120- 360	360-1 200	> 1 200	—
Rép. Dém. d'Allemagne	200- 600	600-1 200	> 1 200	> 5 000
Rép. Féd. d'Allemagne	200- 600	600-3 000	> 3 000	—
URSS (**)	300- 600	600-4 000	> 4 000	—
États-Unis	150-1 000	1 000-2 000	> 2 000	—
	pH de l'eau			
Pologne	—	7,0-6,0	—	< 6,0
Tchécoslovaquie (*)	7,0-6,7	6,7-6,5	< 6,5	< 4,0
URSS (*)	6,5-5,5	5,5-4,0	(**)	< 4,0
Rép. Dém. d'Allemagne	6,0-5,0	5,5-4,0	4,0-3,0	< 3,0
Rép. Féd. d'Allemagne	6,5-5,5	5,5-4,5	< 4,5	—
	Teneur en CO ₂ agressif (mg/l) de l'eau			
Pologne	—	4-20	—	> 20
Tchécoslovaquie (*)	5-8	8-15	> 15	—
Rép. Dém. d'Allemagne	10-90	> 90	(**)	—
Rép. Féd. d'Allemagne	15-30	30-60	> 60	—
URSS (*)	Selon la teneur en CO ₂ à l'état libre			
	Teneur en ions Mg ⁺⁺ (mg/l) de l'eau			
Pologne	—	1 000-2 000	—	> 2 000
Tchécoslovaquie (*)	400-1 000	> 1 000	(**)	—
URSS (*)	1 500-3 500	> 3 500	(**)	—
Rép. Dém. d'Allemagne	100-250	250-500	> 500	—
Rép. Féd. d'Allemagne	100-300	300-1 500	> 1 500	—
	Teneur en ions NH ₄ ⁺ (mg/l) de l'eau			
Rép. Dém. d'Allemagne	100-250	250-500	> 500	—
Rép. Féd. d'Allemagne	15-30	30-60	> 60	—
URSS	Déterminé pour le béton armé seulement			

Notes : (*) Niveau d'agressivité défini par instruction spéciale.

(**) Déterminé à partir de l'intensité de la dégradation du béton.

Table E. — Aggression levels from various national codes

Degree of water aggressiveness	Mild	High	Very high	Excessive
Country	Ions SO_4^{--} content (mg/l) in water			
Poland	—	250- 500	—	> 500
Czechoslovakia (*)	100- 300	300- 800	> 800	—
Great Britain	120- 360	360-1 200	> 1 200	—
East Germany	200- 600	600-1 200	> 1 200	> 5 000
West Germany	200- 600	600-3 000	> 3 000	—
USSR (**)	300- 600	600-4 000	> 4 000	—
USA	150-1 000	1 000-2 000	> 2 000	—
	pH Value of Water			
Poland	—	7.0-6.0	—	< 6.0
Czechoslovakia (*)	7.0-6.7	6.7-6.5	< 6.5	< 4.0
USSR (*)	6.5-5.5	5.5-4.0	(**)	< 4.0
East Germany	6.0-5.0	5.5-4.0	4.0-3.0	< 3.0
West Germany	6.5-5.5	5.5-4.5	< 4.5	—
	Aggressive CO_2 content (mg/l) in water			
Poland	—	4-20	—	> 20
Czechoslovakia (*)	5-8	8-15	> 15	—
East Germany	10-90	> 90	(**)	—
West Germany	15-30	30-60	> 60	—
USSR (*)	According to content of free CO_2			
	Ions Mg^{++} content (mg/l) in water			
Poland	—	1 000-2 000	—	> 2 000
Czechoslovakia (*)	400-1 000	> 1 000	(**)	—
USSR (*)	1 500-3 500	> 3 500	(**)	—
East Germany	100-250	250-500	> 500	—
West Germany	100-300	300-1 500	> 1 500	—
	Ions NH_4^+ content (mg/l) in water			
East Germany	100-250	250-500	> 500	—
West Germany	15-30	30-60	> 60	—
USSR	Defined for reinforced concrete only			

Notes : (*) Degree of aggressiveness defined by special instruction.
 (**) Determined from intensity of concrete corrosion.

Tableau F. — Niveaux d'agressivité due aux sulfates et qualités requises des ciments (Royaume-Uni)

Classe	Concentrations en sulfates exprimées en SO ₃			Type de ciment	Valeurs requises pour un béton très compact fabriqué avec des granulats répondant aux prescriptions de BS 882 ou 1047	
	Dans le sol		Dans l'eau de la nappe (g/l)		Dosage minimal en ciment (kg/m ³)	Rapport E/C (1) maximal
	Total SO ₃ (%)	SO ₃ dans un échantillon d'eau/sol de 2/1 (g/l)				
1	< 0,2	< 1,0	< 0,3	Ciment Portland artificiel (CPA).	250	0,70
				Ciment Portland Prompt — ou combinaisons de ciment avec laitier (3) ou cendres volantes (4). Ciment Portland de laitier		
2	0,2 à 0,5	1,0 à 1,9	0,3 à 1,2	CPA ou Ciment Portland Prompt ou combinaisons de ciment avec laitier ou cendres volantes. Ciment Portland de laitier	330	0,50
				CPA ou Ciment Portland Prompt combiné avec au moins 70 % ou au plus 90 % de laitier (5). CPA ou Ciment Portland Prompt combiné avec au moins 25 % ou au plus 40 % de cendres volantes (6)		
				Ciment Portland résistant aux sulfates		
3	0,5 à 1,0	1,9 à 3,1	1,2 à 2,5	CPA ou Ciment Portland Prompt combiné avec au moins 70 % ou au plus 90 % de laitier. CPA ou Ciment Portland Prompt combiné avec au moins 25 % ou au plus 40 % de cendres volantes	380	0,45
				Ciment Portland résistant aux sulfates		
4	1,0 à 2,0	3,1 à 5,6	2,5 à 5,0	Ciment Portland résistant aux sulfates	370	0,45
5	> 2	> 5,6	> 5,0	Ciment Portland résistant aux sulfates + revêtement de protection (7)	370	0,45

1. Teneur en laitier ou en cendres volantes incluse. Les teneurs en ciment données correspondent à des bétons avec granulats de 20 mm maximum. En vue de maintenir la teneur en ciment du mortier à des valeurs identiques, les teneurs en ciment minimales données seront augmentées de 50 kg/m³ pour une granulométrie maximale de 10 mm et peuvent être diminuées de 40 kg/m³ pour une granulométrie maximale de 40 mm.

2. Dans le cas de semelles filantes et de remblayage de tranchées pour des bâtiments de faible hauteur sur un site classé en classe I par rapport aux sulfates, une marge supplémentaire est admise en ce qui concerne le dosage en ciment et le rapport E/C.

3. Laitier de haut fourneau, granulé broyé. Une nouvelle norme BS est en préparation.

4. Cendres volantes triées ou classées selon la norme BS 3892. Une nouvelle norme est en préparation.

5. Pourcentage, en poids, du mélange laitier/ciment.

6. Pourcentage, en poids, du mélange cendres volantes/ciment.

7. Voir CP 102.

Table F. — Sulphate aggression levels and cement requirements
(United Kingdom)

Class	Concentrations of sulphates expressed as SO ₃			Type of cement	Requirements for dense fully compacted concrete made with aggregates meeting the requirements of BS 882 or 1047		
	In soil		In ground-water (g/l)		Minimum cement content (1) (kg/m ³)	Maximum free water/cement (1) ratio	
	Total SO ₃ (%)	SO ₃ in 2 : 1 water/soil extract (g/l)					
1	Less than 0.2	Less than 1.0	Less than 0.3	Ordinary Portland cement (OPC). Rapid Hardening Portland cement (RHPC) — or combinations of either cement with slag (3) or pfa (4). Portland Blastfurnace cement (PBFC)	Plain concrete (2)	250	0.70
					Reinforced concrete	300	0.60
2	0.2 to 0.5	1.0 to 1.9	0.3 to 1.2	OPC or RHPC or combinations of either cement with slag or pfa. PBFC		330	0.50
				OPC or RHPC combined with minimum 70 % or maximum 90 % slag (5). OPC or RHPC combined with minimum 25 % or maximum 40 % pfa (6)		310	0.55
				Sulphate Resisting Portland cement (SRPC)		290	0.55
3	0.5 to 1.0	1.9 to 3.1	1.2 to 2.5	OPC or RHPC combined with minimum 70 % or maximum 90 % slag. OPC or RHPC combined with minimum 25 % or maximum 40 % pfa		380	0.45
				SRPC		330	0.50
4	1.0 to 2.0	3.1 to 5.6	2.5 to 5.0	SRPC		370	0.45
5	Over 2	Over 5.6	Over 5.0	SRPC + protective coating (7)		370	0.45

1. Inclusive of content of pfa or slag. These cement contents relate to 20 mm nominal maximum size aggregate. In order to maintain the cement content of the mortar fraction at similar values, the minimum cement contents given should be increased by 50 kg/m³ for 10 mm nominal maximum size aggregate and may be decreased by 40 kg/m³ for 40 mm nominal maximum size aggregate.

2. When using strip foundations and trench fill for low-rise buildings in Class 1 sulphate conditions further relaxation in the cement content and water/cement ratio is permissible.

3. Ground granulated blastfurnace slag. A new BS is in preparation.

4. Selected or classified pulverised-fuel ash to BS 3892. A new BS superseding BS 3892 is in preparation.

5. Per cent by weight of slag/cement mixture.

6. Per cent by weight of pfa/cement mixture.

7. See CP 102.

Tableau G. — Niveaux d'agressivité due aux sulfates
et qualités requises des ciments (États-Unis - Bureau of Reclamation)

Niveau relatif d'agression due aux sulfates	Pourcentage eau/sulfate soluble (SO ₄) dans les échantillons de sol	Sulfate (SO ₄) dans les échantillons d'eau (mg/l)
Négligeable	0,00 à 0,10	0 à 150
Positive (1)	0,10 à 0,20	150 à 1 500
Sévère (2)	0,20 à 2,00	1 500 à 10 000
Très sévère (3)	2,00 ou plus	10 000 ou plus

1. Utilisation du ciment type II.
2. Utilisation du ciment type V ou d'un mélange approuvé de ciment Portland et de pouzzolanes assurant, d'après les essais effectués, le même niveau de résistance aux sulfates (lorsqu'ils sont utilisés dans le béton).
3. Utilisation du ciment type V additionné de pouzzolanes, conférant au béton de ciment de type V une meilleure résistance aux sulfates, d'après les essais effectués.

Table G. — Sulphate aggression levels and cement requirements
(United States Bureau of Reclamation)

Relative degree of sulphate attack	Percent water-soluble sulphate (as SO ₄) in soil samples	mg/l sulphate (as SO ₄) in water samples
Negligible	0.00 to 0.10	0 to 150
Positive (1)	0.10 to 0.20	150 to 1 500
Severe (2)	0.20 to 2.00	1 500 to 10 000
Very severe (3)	2.00 or more	10 000 or more

1. Use type II cement.
2. Use type V cement, or approved combination of Portland cement and pozzolan which has been shown by tests to provide comparable sulphate resistance when used in concrete.
3. Use type V cement plus approved pozzolan which has been determined by tests to improve sulphate resistance when used in concrete with type V cement.

Tableau H. — Agressivité de solutions et de sols
(Norme Française P 18-011 - Mai 1985)

a) Agressivité des solutions en fonction de leur concentration en agents agressifs et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale.				
Degré d'agressivité	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Agents agressifs	Concentration en mg/l			
CO ₂ agressif (*)	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO ₄ ²⁻	250 à 600	600 à 1 500 (1)	1 500 à 6 000	> 6 000
Mg ⁺⁺	100 à 300	300 à 1 500	1 500 à 3 000	> 3 000
NH ₄ ⁺	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
pH	6,5 à 5,5	5,5 à 4,5	4,5 à 4	< 4
(1) La limite est fixée à 3 000 mg/l pour l'eau de mer.				
b) Cas de l'eau douce.				
TAC (**)	≤ 1 mé/l	—	—	—
c) Agressivité des sols en fonction de la teneur en SO ₄ ²⁻ .				
% SO ₄ ²⁻ dans le sol sec (***)	0,24 — 0,6	0,6 — 1,2	1,2 — 2,4	> 2,4
mg/l de SO ₄ ²⁻ extrait du sol (****)	1 200 à 2 300	2 300 à 3 700	3 700 à 6 700	> 6 700
Niveau de protection	1	2	2	3
(*) CO ₂ agressif = excès de CO ₂ dissous par rapport au CO ₂ nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg. (**) TAC titre alcalimétrique complet (norme NF T 90-036), 1 mé = 5 degrés français = 2,8 degrés allemand. (***) Extraction par HCl à chaud. (****) Extraction par l'eau : rapport eau/sol = 2/1.				

Si plusieurs agents agressifs sont présents simultanément, la classe d'agressivité à prendre en compte est celle de l'agent dont la concentration ou le pH correspond au plus fort degré d'agressivité.

Si les agents agressifs sont en concentrations inférieures à celles qui correspondent au degré faiblement agressif, l'environnement est considéré comme non agressif (A₀).

Table H. — Aggressiveness of solutions and soils
(French Standard P 18-011 - May 1985)

a) Aggressiveness of solutions in relation to their concentration of aggressive agents and pH : stagnant or slowly flowing water, temperate climate, normal pressure.				
Degree of aggressiveness	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Aggressive agents	Concentration in mg/l			
Aggressive CO ₂ (*)	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO ₄ ^{- -}	250 à 600	600 à 1 500 (1)	1 500 à 6 000	> 6 000
Mg ⁺⁺	100 à 300	300 à 1 500	1 500 à 3 000	> 3 000
NH ₄ ⁺	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
pH	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	4.5 à 4	< 4
(1) The limit is fixed 3 000 mg/l for seawater.				
b) Case of freshwater.				
CAT (**)	≤ 1 me/l	—	—	—
c) Aggressiveness of soils according to their SO ₄ ^{- -} content.				
% SO ₄ ^{- -} in dry soil (***)	0.24 — 0.6	0.6 — 1.2	1.2 — 2.4	> 2.4
mg/l of SO ₄ ^{- -} extracted from soil (****)	1 200 à 2 300	2 300 à 3 700	3 700 à 6 700	> 6 700
Level of protection	1	2	2	3
(*) Aggressive CO ₂ = excess of dissolved CO ₂ in relation to the CO ₂ necessary to keep Ca and Mg subcarbonates in solution. (**) CAT complete alkalimetric concentration (standard NF T 90-036), 1 me = 5 French degrees = 2.8 German degrees. (***) Extraction by hot HCl. (****) Extraction by water : water/soil ratio = 2/1.				

If several aggressive agents are present simultaneously, the class of aggressivity to consider is that of the agent whose concentration or pH corresponds to the highest degree of aggressivity.

If the concentrations of the aggressive agents are lower than those corresponding to the weakly aggressive degree, the environment is considered non-aggressive (A₀).

Tableau I. — Définition des classes d'agressivité
(Norme Française P 18-011 - Mai 1985)

Environnement	Symbole	Mesures de protection	Niveau de protection
Faiblement agressif	A ₁	Pas de mesures particulières. Le béton fabriqué suivant les règles de l'art doit être compact par ses qualités intrinsèques.	1
Moyennement agressif	A ₂	Adaptation de la composition et de la mise en œuvre aux conditions du milieu (dosage en ciment, catégorie de ciment, E/C, cure, adjuvants).	2
Fortement agressif	A ₃	Adaptation de la composition et de la mise en œuvre aux conditions du milieu avec action spécifique sur la nature et le dosage en ciment, le rapport E/C.	2
Très fortement agressif	A ₄	Nécessité d'une protection externe (enduits, peintures) ou interne (imprégnation).	3

Table I. — Definition of categories of aggressiveness
(French Standard P 18-011 - May 1985)

Environment	Symbol	Protection measures	Level of protection
Slightly aggressive	A ₁	No special measures. Concrete prepared according to the prescribed procedure must be dense by virtue of its intrinsic qualities.	1
Fairly aggressive	A ₂	Adaptation of composition and implementation to the conditions of the environment (proportion of cement, category of cement, W/C, curing, additives).	2
Very aggressive	A ₃	Adaptation of composition and implementation to the conditions of the environment with specific action with regard to the nature and proportion of cement, and W/C ratio.	2
Extremely aggressive	A ₄	Necessity for external protection (coatings, paint) or internal protection (impregnation).	3

5. EFFETS NUISIBLES

5.1. PERTE DE RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Les effets de l'agression (lessivage de la pâte de ciment par l'eau douce, dissolution du béton par les acides et lessivage de la pâte de ciment ou dislocation du béton par les sulfates) se manifestent par une perte de résistance mécanique. Le plus souvent, un barrage en béton est suffisamment massif pour tolérer cette perte de résistance. Mais on connaît plusieurs cas de barrages en Suède, construits avant 1930, que l'on a dû remplacer par suite de dommages causés par l'eau douce [14]. Plus récemment, le barrage-voûte de Drum Afterbay, de 30 m de hauteur, aux États-Unis, a dû être abandonné lorsque les contrôles ont révélé une progression de la détérioration du béton telle que le niveau de contraintes dans la voûte était devenu excessif [9]. Dans ce cas précis, la détérioration provenait du lessivage, de l'attaque par les sulfates et de la réaction alcali-granulats.

Les recherches conduites pour préciser la perte de ciment dans un barrage-poids en Norvège, sur une période de 45 ans [20] ont révélé une perte totale de 32 000 kg de ciment. Cette valeur correspond à une perte de 2,3 % du béton du parement amont à dosage élevé et l'on n'a pas jugé que le barrage était menacé. Une recherche analogue au barrage d'Avon en Australie [21, 22] indiqua une perte minimale de ciment de 1 520 kg/an, correspondant à 20,3 t de béton par an subissant une perte totale de résistance. On a conclu qu'il y avait là un problème à long terme. Par ailleurs, la perte de résistance mécanique peut directement menacer la tenue d'éléments plus petits faisant partie du barrage, tels que des éléments porteurs.

5.2. AUGMENTATION DES DÉBITS DE DRAINAGE

La perte de matériaux par lessivage est accompagnée d'une augmentation des débits de percolation et de drainage. Ce phénomène posa un problème au barrage d'Agger en Allemagne Fédérale [23], devant assurer l'alimentation en eau potable en période d'étiage. D'importants travaux d'étanchéité furent nécessaires dans le corps du barrage (voir Annexe A).

L'augmentation des débits de drainage peut surcharger les pompes. Au barrage de Victoria (Sri Lanka), les matériaux du barrage et du rideau d'injection, lessivés par l'eau douce, se déposèrent dans les puisards, nécessitant le démontage et le nettoyage réguliers des pompes. On a installé dans le puisard un dispositif de traitement de l'eau pour éviter ce problème.

L'effet plus courant de l'augmentation des percolations est probablement l'accroissement des sous-pressions, menaçant la tenue des profils-poids (voir paragraphe 5.3).

5.3. AUGMENTATION DE LA SOUS-PRESSION

L'augmentation de la sous-pression constitue un problème important sur les

5. DELETERIOUS EFFECTS

5.1. LOSS OF STRENGTH

The effects of leaching the cement paste by soft water attack, dissolving the concrete by acid attack and leaching the cement paste or disrupting the concrete by sulphate attack, will all cause loss in strength. In most cases a concrete dam will be sufficiently massive for the loss in strength to be tolerated. There are, however, recorded cases of several dams in Sweden built prior to 1930 which eventually had to be replaced following soft water attack [14]. More recently the 30 m high Drum Afterbay arch dam in the USA had to be abandoned and a replacement dam constructed after investigations showed that concrete deterioration had progressed to such an extent that the arch was being overstressed [9]. In this case deterioration was due to the combined effects of leaching, sulphate attack and alkali-aggregate reactivity.

Investigations into cement loss over 45 years from a gravity dam in Norway [20] gave a total cement loss of 32 000 kg. This represented a 2.3 % loss from the rich upstream facing mix and was not considered to be a problem. A similar investigation at Avon dam in Australia [21 and 22] indicated a minimum cement loss of 1 520 kg/year, or the equivalent of 20.3 tonnes of concrete a year suffering a complete loss in strength. This was considered a matter of serious long term concern. Loss in strength can also pose a direct threat to the integrity of smaller elements associated with a dam such as structural members.

5.2. INCREASED DRAINAGE FLOWS

Associated with loss of materials due to leaching will inevitably be an increase in seepage and drainage flows. This proved to be a problem at Agger dam in West Germany [23] where the dam was required to maintain drinking water supplies during times of low river flow. Extensive sealing works were carried out on the dam wall, see Appendix A.

Increased drainage flows will also further increase demands on drainage pumps. At the Victoria dam in Sri Lanka soft water leaching removed material from both the dam and the main grout curtain which then precipitated out in the main drainage sumps, requiring the pumps to be regularly dismantled and cleaned. Eventually water treatment facilities were installed in the sump to prevent this requirement.

Probably the most widespread effect of increased drainage flows is to increase uplift and threaten the stability of gravity sections, see Section 5.3.

5.3. INCREASED UPLIFT

Increased uplift is a widespread problem where leaching has increased seepage

barrages où le lessivage a provoqué une augmentation des percolations (par exemple, barrage d'Avon, Australie [22]). Ce phénomène a réduit la stabilité de ce barrage-poids au-dessous du seuil acceptable et il a fallu construire un remblai en terre contre le parement aval afin de rétablir la stabilité.

Une augmentation de la sous-pression peut également être associée à une diminution du débit de percolation. Au barrage en maçonnerie de Janov (Tchécoslovaquie) [24], l'eau agressive a entraîné, par lessivage, l'hydrate de calcium du mortier à la cadence de 10 t/an d'oxyde de calcium équivalent. Une bonne partie de ces matériaux s'est déposée dans le réseau des drains de décompression sous forme de carbonates de calcium, de sodium et de potassium. Ainsi, ces drains se sont progressivement colmatés, les débits de percolation ont diminué, et l'intensité des sous-pressions a augmenté, avec pour effet la réduction de la résistance au glissement. La remise en état des réseaux de drainage bloqués par des dépôts est, en général, très difficile.

5.4. RÉDUCTION DE LA COHÉSION

Actuellement, le calcul de la stabilité au glissement des barrages-poids fait souvent intervenir le paramètre « cisaillement-frottement » [25]. Celui-ci tient compte à la fois du frottement et de la cohésion sur la surface potentielle de glissement. Dans le paragraphe 3.3.1., on a précisé que les joints de reprise de bétonnage constituent autant de chemins de percolation potentiels, favorisant la perte de liant. Ainsi, on peut penser que, si le lessivage est soupçonné, les contrôles de stabilité doivent tenir compte du cas d'une perte partielle, ou totale, de la cohésion, la stabilité au glissement étant assurée seulement par le frottement, ou par le frottement associé à une cohésion réduite. Étant donné la nature massive des barrages, il peut être approprié, dans de tels cas, d'émettre l'hypothèse que le barrage, à un certain moment, compte seulement sur le frottement pour sa stabilité au glissement.

5.5. CORROSION DES ARMATURES

La carbonatation du béton due au lessivage par l'eau douce, ou la dislocation du béton par les sulfates, sont deux mécanismes exposant les armatures à la corrosion. La corrosion accélère la dislocation du béton; au mieux, le résultat est peu esthétique; au pire, la tenue de l'ouvrage peut être compromise.

5.6. EFFETS HYDRAULIQUES

Une surface devenue rugueuse par mise à nu des gros granulats après perte de ciment provoque une plus grande perte de charge dans l'écoulement qu'une surface lisse. Dans le cas des écluses, des déversoirs ou des bassins de dissipation, l'effet sera probablement peu important, mais il peut être grave sur les coursiers à écoulement à forte vitesse ou dans les galeries hydrauliques de grande longueur.

flows, for example at Avon dam in Australia [22]. The increased uplift reduced the stability of the gravity structure to below acceptable levels and an earth embankment was constructed against the downstream face of the dam to restore stability.

Increased uplift may also be associated with decreasing seepage flows. At Janov masonry dam in Czechoslovakia [24] aggressive water has leached calcium hydroxide from the mortar at the rate of 10 tonnes of equivalent calcium oxide per year. Much of this deposited out in the drainage relief system as calcium, sodium and potassium carbonates, gradually blocking the system, decreasing seepage flows but increasing uplift and reducing sliding stability. The restoration of drainage systems blocked by deposition is generally extremely difficult.

5.4. REDUCED COHESION

Modern analyses of the sliding stability of gravity dams often features the so-called “ shear-friction ” [25]. This allows for both friction and cohesion along the potential sliding surface. It was mentioned in Section 3.3.1 that lift joints and concrete/rock interfaces can represent potential seepage paths where loss of cementitious material can easily occur. This would suggest that where leaching is thought to be a problem, checks on stability should also include the case where some, or all, cohesion is assumed to have been lost, with sliding stability relying on friction alone, or friction in conjunction with a reduced cohesion. It may be appropriate in such circumstances, given the monumental nature of dams, to assume that there will eventually come a time when the dam will have to rely only on friction, for stability against sliding.

5.5. CORROSION OF REINFORCEMENT

The carbonation of concrete due to soft water leaching, or the disruption of concrete due to sulphate attack, can both expose embedded reinforcement to corrosion. This will enhance disruption of the concrete and at best appear unsightly while at worst threaten the integrity of the structure concerned.

5.6. HYDRAULIC EFFECTS

A surface which has become roughened due to cement loss, exposing the coarse aggregate, will produce greater head losses in flowing water than would a smooth surface. This is unlikely to be important in the case of locks, overspills or stilling basins but could be so in the case of high velocity chutes and long tunnels.

5.7. ESTHÉTIQUE

L'importance de l'aspect esthétique de l'ouvrage ne doit pas être mésestimée. L'écaillage du béton et les efflorescences donnent immédiatement l'impression, même au non-initié, que « quelque chose ne vas pas », même si les désordres ont peu de conséquences. Par ailleurs, les mousses et les lichens sont peu esthétiques et sont à éviter.

5.8. POCHE DE GAZ

Le chapitre 2 indique plusieurs formes d'attaque résultant de la production de gaz, tels que l'anhydride carbonique et l'acide sulfhydrique. Des asphyxies de personnel se sont produites lorsque de tels gaz se sont accumulés dans les puisards de drainage ou des zones non ventilées, sans être détectés.

5.7. APPEARANCE

The importance of appearance should not be underrated. Spalling and efflorescence give an immediate impression, even to the layman, that something is wrong, although in fact the damage may not be too serious. Moss and lichen growth too can look unsightly and undesirable.

5.8. GAS POCKETS

It should be noted from Chapter 2 that many forms of attack result in the production of gases such as carbon dioxide and hydrogen sulphide. Asphyxiation of personnel has occurred where such gas has built up undetected in drainage sumps or unventilated areas.

6. MESURES PRÉVENTIVES

6.1. INTRODUCTION

La littérature technique, ainsi que les réponses au questionnaire diffusé avant la rédaction du présent rapport, précisent que la fabrication d'un béton dense et sain est un facteur prépondérant pour assurer sa résistance aux agents agressifs. Plus généralement, les exigences peuvent se résumer comme suit :

- Grande compétence dans la conception de l'ouvrage et les études de détail.
- Grand soin dans l'étude de la composition du béton.
- Surveillance étroite des travaux.
- Au besoin, utilisation de moyens spéciaux appropriés (matériaux, techniques, détails de bétonnage).

Ces éléments sont précisés dans les chapitres suivants.

6.2. DÉFINITION DE LA COMPOSITION DU BÉTON

6.2.1. Granulats

Un très grand nombre d'auteurs [7, 9, 26] et de réponses au questionnaire attribuent la détérioration du béton des barrages aux causes suivantes : granulométrie inadéquate, sable anguleux ou sale, excès ou insuffisance de sables. Davis [1] souligne que la définition de la composition du béton doit tenir compte des caractéristiques des granulats afin d'obtenir un béton sain et dense, plutôt que d'avoir recours à des dosages normalisés. De plus, cet auteur préconise l'utilisation de granulats ne nécessitant que peu d'eau de gâchage et présentant une bonne granulométrie, en particulier pour le sable. Celle-ci réduit la ségrégation et le ressuage que le Comité 212 de l'ACI considère comme étant parmi les premières causes de perméabilité du béton.

En ce qui concerne plus particulièrement l'attaque par l'eau douce et par les acides, plusieurs auteurs [1, 8, 27, 28] préconisent l'utilisation de granulats de calcaire ou de dolomie. Cela n'élimine pas l'attaque mais réduit son effet en neutralisant une bonne partie de l'eau agressive qui, autrement, attaquerait la pâte de ciment. Dans le cas des dolomies, des essais destinés à déceler une réaction alcali-granulats éventuelle sont nécessaires.

6.2.2. Ciments

En ce qui concerne la pérennité du béton dans un milieu agressif, il y a trois aspects importants relatifs au ciment utilisé. En fait, il faut :

- une quantité suffisante de liant pour assurer le remplissage de tous les vides dans le béton;
- un rapport eau/ciment suffisamment bas pour conférer à la pâte de ciment une faible perméabilité;

6. PREVENTIVE MEASURES

6.1. INTRODUCTION

In order to resist attack from aggressive agents, both the literature and the replies to the questionnaire circulated prior to the preparation of this report agree that an overwhelmingly important factor is the production of sound, dense concrete. More generally the requirements can be summarized as :

- Competent design and detailing.
- Careful attention to concrete mix design.
- Strict site supervision.
- The provision of special materials, techniques or details where appropriate.

The following sections explore these aspects in more detail.

6.2. CONCRETE MIX DESIGN

6.2.1. Aggregate

A considerable number of questionnaire replies and authors [7, 9 and 26] relate the deterioration of dam concrete to poorly graded aggregate, harsh or dirty sand and under or over sanding. Davis [1] emphasizes the point that mixes should be designed to suit the aggregate, in order to achieve sound, dense concrete, rather than by resorting to nominal proportioning. He also recommends that the aggregate used should have a low water demand and be well graded, particularly the sand. The latter will reduce segregation and bleeding which ACI Committee 212 refer to as one of the major causes of permeability in concrete.

With particular regard to soft water and acid attack, various authors [1, 8, 27 and 28] recommend the use of sacrificial limestone or dolomite aggregate. This does not eliminate attack but reduces its effect by neutralising a large proportion of aggressive water which would otherwise be free to attack the cement paste. In the case of dolomite aggregate care should be taken to test for alkali-reactivity.

6.2.2. Cements

Three aspects of the cement content of a concrete mix are important with regard to durability against aggressive attack :

- A sufficient quantity of cementitious material to ensure that all internal voids in the concrete have been filled.
- A sufficiently low water/cement ratio, to ensure a low permeability cement paste.

— l'utilisation de ciments spéciaux ou de matériaux de remplacement pour résister à un type spécifique d'attaque chimique.

Dans le chapitre 6.2.3. ci-dessous, on consacre un paragraphe spécial à la question du rapport eau/ciment. Dans le présent chapitre, on se limite aux problèmes du dosage en ciment et du type de ciment à utiliser.

On a déjà signalé (paragraphe 3.3.1. et 5.1) qu'un certain nombre de barrages construits en Suède avant 1930 avaient dû être abandonnés après un temps plus ou moins long. Ces barrages avaient été construits à l'aide d'un béton à faible dosage en ciment (150 à 200 kg/m³) et à fort rapport E/C (0,8 à 1). La forte perméabilité résultante, en présence de l'eau de la retenue, douce et agressive, entraîna une dissolution rapide du béton du barrage. Selon Fristrom et Sallstrom [14], la technique suédoise évolua vers un dosage minimal de 275 à 350 kg/m³, pour revenir finalement à 200 à 250 kg/m³.

Le dosage minimal acceptable est discuté. Ce n'est guère étonnant, puisque le niveau d'agressivité naturelle du milieu, ainsi que la composition chimique d'un ciment donné, varient selon le pays ou la région concernés. Les réponses au questionnaire indiquent que, si l'agression acide est prévue, le dosage minimal en ciment est normalement compris entre 260 et 320 kg/m³. Bien sûr, un dosage excessif peut aggraver le problème de la fissuration thermique qui, elle-même, constitue une menace potentielle en cas d'agressivité du milieu (voir paragraphe 3.3.1).

L'influence du type de ciment choisi sur la pérennité du béton est traitée dans le Bulletin 36 a, chapitre 4, publié par la CIGB [29]. Elle est également mentionnée dans diverses autres publications [1, 5, 7, 8, 18, 30], mais généralement à propos d'agression par les sulfates. Le lecteur pourra utilement se reporter au Bulletin 36 a pour plus de détails concernant les barrages. Cependant, quelques commentaires généraux sont présentés ci-après.

Il est évident que, dans un milieu riche en sulfates, l'utilisation d'un ciment Portland résistant aux sulfates est souhaitable. Dans ce type de ciment, la teneur en aluminat tricalcique est généralement limitée à environ 5 % et, dans certains cas (BS 4027), à 3,5 % seulement. On obtient ainsi une plus forte teneur en aluminoferrite tétracalcique incapable d'une réaction d'expansion avec les sulfates [10]. Selon la référence [18], un résultat analogue est obtenu avec un mélange de ciment Portland ordinaire (ou ciment Portland artificiel CPA) et de granulats de laitier de haut-fourneau broyé (laitier), pour une teneur en laitier de plus de 70 %, et, également, avec un mélange de CPA et de cendres volantes pour une teneur en cendres volantes supérieure à 25 %. Pour les milieux dans lesquels les sulfates sont particulièrement agressifs, on devra utiliser des ciments spéciaux, conçus et testés convenablement, ou des enduits de protection.

Le ciment Portland de laitier (CPJ, CHF, CLK) est réputé être partiellement résistant au lessivage par l'eau douce et aux attaques acides, par suite de la teneur réduite en hydrate de calcium par rapport au CPA [29]. Cette caractéristique s'applique également aux ciments contenant des pouzzolanes. Il existe aussi des exemples de ciment fondu utilisé avec succès pour combattre l'agression des eaux douces sur certains aménagements hydro-électriques en Écosse [5]. De plus, les ciments CPJ, CHF, CLK à air occlus semblent résister à la croissance des mousses sur certains barrages [7].

Le Tableau J est extrait du Bulletin 36 a de la CIGB. En regard de chaque type de ciment, il donne les caractéristiques du béton correspondant, l'application à la

— The use of special cements or replacements to resist specific forms of chemical attack.

Water/cement ratio is dealt with as a separate topic in Section 6.2.3. below and the remainder of this section therefore concentrates on cement quantity and type.

It has already been mentioned, in Sections 3.3.1 and 5.1, that a number of dams built in Sweden prior to 1930 had eventually to be abandoned. These dams were constructed using concrete with low cement contents of 150 to 200 kg/m³ and high water/cement ratios of 0.8 to 1.0. The high permeability which resulted, combined with the soft, aggressive reservoir water which the dams impounded, led to a rapid dissolution of the dam concrete. Fristrom and Sallstrom [14] report that Swedish practice then changed to minimum cement contents of 275 to 350 kg/m³ but later relaxed to 200 to 250 kg/m³.

Opinions on minimum cement content vary. This is not surprising as the degree of natural environmental aggressivity and the chemical composition of similar cements will vary from country to country and from region to region. The replies to the questionnaire suggested that, where aggressive attack is thought to be likely, minimum cement contents are normally in the range of 260 to 320 kg/m³. Too high a cement content can of course aggravate the problem of thermal cracking, itself a potential danger with regard to aggressive attack, see Section 3.3.1.

The influence of cement type on durability of concrete is covered in Chapter 4 of ICOLD Bulletin 36a [29]. It is also referred to in various other publications [1, 5, 7, 8, 18 and 30] but generally with regard to sulphate attack. It is suggested that ICOLD Bulletin 36a be referred to for a detailed discussion of the matter as it relates to dams. Nevertheless, some general comments will be made here.

Clearly in high sulphate environments, sulphate resisting Portland cement (SRPC) is advisable. In such cements the tricalcium aluminate content is generally limited to about 5 % and in some cases, such as BS 4027, to only 3.5 %. This results in a higher percentage content of tetracalcium aluminoferrite with which sulphates do not react expansively [10]. It is claimed [18] that similar sulphate resisting properties can be ascribed to a mix of ordinary Portland cement (OPC) and ground granulated blastfurnace slag (slag), where the slag content exceeds 70 % and also to mixtures of OPC and pulverised fuel ash (PFA or “ fly-ash ”) where the PFA content exceeds 25 %. In particularly aggressive sulphate environments, special cements, properly designed and tested, or barrier coatings, should be used.

Portland blastfurnace cement (PBFC) is reported to be partially resistant to leaching by soft water and to acid attack, in view of its reduced calcium hydroxide content compared with OPC [29]. A similar argument applies to pozzolanic cements. High alumina cement (HAC) is also reported to have been successfully used to resist aggressive attack by soft water at hydro electric schemes in Scotland [5]. Furthermore air entrained PBFC concrete seems to have successfully resisted moss growth at dams [7].

Table J is reproduced from ICOLD Bulletin 36a. It relates cement type to concrete characteristics, to applicability for dam construction and to resistance to leaching and sulphate attack.

construction des barrages, et la résistance au lessivage et à l'agression par les sulfates.

Avant de choisir un ciment, il importe de déterminer la nature et le niveau du risque éventuel d'agression (chapitre 4 « Analyses de l'eau »). Comme il est dit plus haut, les types d'agents agressifs, ainsi que les propriétés des ciments, varient d'un pays à l'autre; il est recommandé de consulter les normes et les experts en cas de craintes. L'Annexe B donne la liste de quelques normes et codes utiles.

Les Tableaux F et G à la fin du chapitre 4 donnent des caractéristiques exigées pour le ciment en cas de risque d'agression par les sulfates.

Les pérennités relatives des divers ciments, mélanges ou adjuvants peuvent aussi être évaluées par des essais de perméabilité. L'eau utilisée reproduira le type d'agression prévu et fera l'objet d'une analyse chimique avant et après passage à travers les échantillons de béton. L'importance relative d'altération chimique indiquera les niveaux relatifs de réaction avec le ciment. Des essais de résistance peuvent être effectués sur les échantillons après les essais de perméabilité, les résultats étant comparés à ceux obtenus sur des échantillons non soumis à des essais de perméabilité.

6.2.3. Rapport eau/ciment

Davis [1] indique que le rapport E/C est un paramètre encore plus important que le dosage total en ciment, en ce qui concerne la résistance aux agents agressifs. Si une certaine quantité de liant est nécessaire pour remplir les vides et colmater les chemins de percolation éventuels, la présence de pores et de capillaires dans une pâte perméable à fort rapport E/C expose une plus grande partie de la matrice du ciment à l'action rapide des agents agressifs et à la dissolution. La Fig. 3 montre la relation entre la perméabilité et le rapport E/C. On voit que la perméabilité augmente très vite avec des rapports E/C supérieurs à 0,55, une valeur de 0,6 étant souvent définie comme la limite supérieure pour le béton des barrages. Il y a évidemment un avantage supplémentaire si l'on peut réduire le rapport E/C à 0,5 ou au-dessous. Cela peut être réalisé au moyen d'une définition soignée de la composition du béton et par l'utilisation d'adjuvants modernes, et doit être recherché en cas de menace d'agression. Lea cite des rapports E/C de 0,40 et de 0,45 dans des bétons exposés à l'eau de mer (paragraphe 6.8 ci-dessous). Van Aardt et Fulton [8] font mention d'un béton dense fabriqué à l'aide de ciment sursulfaté avec E/C de 0,40, ayant résisté à l'action d'acides minéraux ayant un pH de 3,5.

Dans plusieurs réponses au questionnaire, on fait le rapprochement entre la détérioration de barrages et un fort rapport E/C. Il y a eu des problèmes du même ordre sur des barrages suisses [26] à cause de la mise en place par gravité de béton très « fluide ».

Il est rappelé de nouveau que les circonstances varient d'un site à un autre et il faut se référer aux normes locales; cependant, il convient de souligner l'importance d'un rapport E/C faible pour assurer la pérennité. Davis [1] cite le Comité 201 de l'ACI, qui voit dans le rapport E/C le meilleur moyen entre les mains du personnel de chantier pour contrôler la qualité du béton; en effet, un E/C faible est une garantie de résistance mécanique, d'imperméabilité et de la plupart des autres caractéristiques recherchées. Voir également les paragraphes 6.2.4., 6.2.5., 6.3 et 6.4 ci-dessous.

Before deciding on cement type it is important that the degree and nature of the potential aggression be established, see Chapter 4 — Water Analyses. As mentioned earlier, types of aggressive agent and cement properties will vary from country to country and it is suggested that appropriate codes be consulted or expert advice sought if there is any reason for concern. A list of codes and standards is provided in Appendix B.

Tables F and G in Chapter 4 represent typical requirements for cement where sulphate attack is being considered.

The relative durabilities of alternative cements, blends, mixes or admixtures may also be assessed by means of permeability testing. The water used should reflect the appropriate type of aggression expected and be chemically analysed before and after passing through the concrete specimens. The relative amounts of chemical alteration to the water will indicate relative degrees of reaction with the cement. This may be supplemented by some form of strength or soundness testing of the specimens, after permeability testing, and comparing these to identical specimens not permeability tested.

6.2.3. Water/Cement Ratio

It is argued by Davis [1] that water/cement ratio is even more important than total cement content in regard to resisting attack by aggressive agents. Whereas sufficient cementitious material is important to fill voids and block potential leakage paths in the concrete, the presence of pores and capillaries in a permeable, high water/cement ratio paste will expose more of the cement matrix to ready attack and dissolution by aggressive agents. Fig. 3 illustrates how permeability varies with water/cement ratio. It can be seen that permeability rises rapidly with water/cement ratios higher than about 0.55, and a ratio of 0.60 is often the upper limit specified for dam concrete. There is clearly an additional advantage if the water/cement ratio can be reduced to 0.50 or below. This should be achievable using careful mix design and modern admixtures and is to be recommended where there is a danger of aggressive attack. Lea quotes water/cement ratios of 0.40 and 0.45 for concrete exposed to seawater, see Section 6.8, while Van Aardt and Fulton [8] refer to dense concrete made with super-sulphated cement and a water/cement ratio of 0.40 successfully resisting attack from mineral acids with a pH of 3.5.

Several questionnaire replies linked deterioration at dams to high water/cement ratio mixes and similar problems are reported in Swiss Dams [26] as a result of using “ wet-chuted ” concrete.

Once again circumstances will vary from place to place and local codes should be consulted. Nevertheless the importance of a low water/cement ratio must be emphasized where durability is concerned. Davis [1] quotes ACI Committee 201 as stating that the water/cement ratio is probably the most effective control in the hands of field staff. A low water/cement ratio is a guide to the strength, impermeability and most of the other sought after characteristics of good concrete. See also Sections 6.2.4, 6.2.5, 6.3 and 6.4.

6.2.4. Adjuvants

Il est clair que les adjuvants sont utiles s'ils permettent de diminuer le rapport E/C. Outre ceux destinés spécifiquement à ce but, les entraîneurs d'air sont également utiles à cet égard. Selon la référence [31], l'entraînement d'air a été utilisé avec succès pour combattre les désordres causés par les sels de déneigement. La microscopie électronique a révélé que ces sels s'accumulaient et s'accroissaient dans les alvéoles, et que, de ce fait, il n'y avait aucune pression de dilatation appliquée au béton.

Il peut être utile de souligner que les adjuvants chimiques ne confèrent pas au béton une résistance chimique contre l'agression par les sulfates, les acides, etc. Leur action est indirecte, mais souvent très efficace, par l'amélioration de la qualité du béton (réduction du dosage en eau,...). La diminution du rapport E/C qui en résulte permet de réduire la perméabilité du béton.

Les produits appelés « hydrofuges » peuvent aussi présenter des avantages; cependant, quel que soit l'adjuvant utilisé, il est souhaitable de comparer les comportements du béton avec et sans l'adjuvant proposé, notamment par rapport aux agents agressifs étudiés (voir paragraphe 6.2.2).

6.2.5. Cure

Une cure appropriée est essentielle pour provoquer des discontinuités capillaires dans la pâte de ciment, assurant ainsi une bonne imperméabilité. Le Tableau K cité par Davis [1] démontre les avantages d'un rapport E/C faible pour obtenir la pérennité du béton.

Il est certain qu'un E/C compris entre 0,60 et 0,50, et inférieur si possible, présente un avantage certain. Selon Davis, le béton frais doit être maintenu humide, en général pendant 5 jours au moins (et plus longtemps en cas d'utilisation d'un ciment Portland de laitier). Il en est de même pour un béton contenant des cendres volantes. Cet auteur précise que l'aspersion régulière, mais intermittente, n'est pas efficace. Par ailleurs, Van Aardt et Fulton [8] soulignent l'importance de la cure du béton frais en milieu agressif; la cure au moyen d'une membrane maintenue humide n'est pas souhaitable, mais, si l'on ne dispose d'aucun autre moyen, ce procédé sera utilisé, soit après un certain temps de cure à l'eau, soit dès la prise du béton ou dès le décoffrage.

6.3. PROJET ET ÉTUDES DE DÉTAIL

Diverses mesures et un soin particulier doivent être apportés lors du projet du barrage et de l'étude des détails afin de réduire le risque de détérioration par les agents agressifs. L'adoption d'écrans étanches est traitée au paragraphe 6.5 ci-dessous. Généralement, les mesures à prendre se déduisent des caractéristiques des zones les plus vulnérables (paragraphe 3.3 ci-dessus), et comprennent :

- utilisation de la préfabrication;
- dans le cas du béton armé, adoption de formes circulaires ou curvilignes, de sections épaisses, de forme simple, plutôt que des sections minces, complexes, nécessitant des renforcements et présentant de nombreux angles (paragraphe 3.2.2.);
- étude soignée des armatures pour éviter une trop grande densité d'aciers, compromettant le bon compactage du béton;

6.2.4. Admixtures

Admixtures will clearly be useful where they can be used to lower the water/cement ratio. Apart from water reducing admixtures, air entraining agents are also useful in this respect. Air entrainment is reported [31] to have been successfully used to combat disruption of concrete by de-icing salts. Electron microscopy revealed that the salts had accumulated and grown in the air voids and were therefore not exerting an expansive stress on the concrete.

It is perhaps worth emphasizing that chemical admixtures do not impart chemical resistance to concrete, against attack by sulphates, acids, etc. Rather they work indirectly, though often very effectively, by enabling the quality of the concrete to be improved, usually by reducing the water demand. This lowers the water/cement ratio, hence reducing permeability.

So called water-proofing admixtures may also have some advantage, however, it is recommended that whatever admixture is used, behavioural comparisons be made between concretes with and without the proposed admixtures and with particular reference to the aggressive agents under consideration. See also Section 6.2.2.

6.2.5. Curing

Adequate curing is essential to bring about capillary discontinuity in cement paste to ensure impermeability. Table K is quoted by Davis [1] and clearly illustrates the advantage of low water/cement ratios in producing durable concrete.

There is an obvious advantage in reducing water/cement ratios of about 0.60 to 0.50 and below, if at all possible. Davis recommends continuous wet curing, in general for at least 5 days, and longer if PBFC is used. The same is also true of concrete made using fly-ash. He notes that regular, but intermittent, spraying is not effective. Van Aardt and Fulton [8] also stress the importance of curing for concrete in aggressive environments and suggest that sprayed membrane curing is not generally advisable under these circumstances. Where there is no alternative, however, they recommend it be employed either after a period of moist curing or immediately after concrete has set or the formwork removed.

6.3. DESIGN AND DETAILING

Various measures, or special care, can be taken over the design and detailing of certain aspects of dams to minimize the dangers of aggressive attack. These may include the provision of waterproof barriers. This is referred to separately under Section 6.5. In general the measures that can be taken follow logically from a consideration of those areas which are most liable to aggressive attack, as outlined in Section 3.3. The measures include the following :

- The use of pre-casting.
- Where reinforcement is present, the use of curved and circular sections and also simple thick details, rather than more complex thin, braced sections with many corners, see Section 3.2.2.
- Careful attention to reinforcement detailing, to avoid areas of congestion which might in turn lead to poorly compacted concrete.

- utilisation d'armatures peu sollicitées (paragraphe 3.3.1);
- étude soignée des joints visant à éviter la fissuration dans la masse du béton (paragraphe 3.3.1);
- béton massif préférable aux voiles minces armés (paragraphe 3.3.1) [8];
- distance adéquate des armatures par rapport aux parois (voir ci-après);
- élimination des zones de remblai perméable (paragraphe 3.3.1);
- ventilation suffisante des galeries (paragraphe 3.3.4);
- en cas de répandage de sels de déneigement, évacuation des écoulements d'eau chargée (paragraphe 3.3.3);
- éventuellement, surépaisseur de béton;
- éventuellement, barrières de protection (membrane, écran,...) en cas de pressions différentielles, ou dans les zones d'écoulement (voir également paragraphe 6.5 ci-dessous).

L'utilisation de la préfabrication, par exemple pour les conduits traversant le barrage, donne une garantie de qualité meilleure, du fait que son contrôle est supérieur à celui exercé sur un chantier. Ainsi, le béton préfabriqué offre, généralement, une meilleure pérennité [8]. En effet, la préfabrication s'opère dans de meilleures conditions de bétonnage, de stockage et de cure, avant la mise en place des pièces en milieu agressif.

L'épaisseur de recouvrement des armatures est également un paramètre essentiel à la protection de celles-ci en milieu agressif. Les recommandations sont variables, mais généralement l'épaisseur minimale est de l'ordre de 50 à 75 mm. Compte tenu de la nature massive des barrages et de la carbonatation inévitable du béton à long terme, cette épaisseur de recouvrement doit être considérée comme un minimum.

Beeby [13] cite un essai intéressant dans lequel des poutres et des dalles en béton armé, aspergées pendant 2 ans d'une solution salée à 3 %, furent cassées pour contrôler l'intensité de corrosion des armatures (recouvrement des armatures : 20 à 50 mm; contraintes dans l'acier : 0 à 248 N/mm²; diamètre : 10 à 35 mm; E/C : 0,49 à 0,62). On conclut que les paramètres essentiels étaient le rapport E/C (paragraphe 6.3 ci-dessus) et le rapport recouvrement/diamètre de l'armature. Lorsque le second rapport est inférieur à 1, le niveau de corrosion était de 100 %; pour une valeur de 3 et plus, la corrosion était nulle (voir Fig. 4 et 5). Mason [32] a étudié dans quelle mesure ces résultats s'appliquaient aux barrages. Cette étude concernait surtout l'agression par les chlorures. En cas de lessivage chimique, il semble que deux autres paramètres interviennent : ce sont le niveau de contrainte dans l'acier et l'intensité de la fissuration.

Enfin, dans le cas du béton compacté au rouleau, à faible dosage en ciment, une attention particulière est à apporter, en milieu agressif, à l'étanchéité et à la réduction des percolations afin d'éviter la détérioration du béton (paragraphe 3.3.1).

6.4. SURVEILLANCE DU CHANTIER

Pour réduire les risques de détérioration par l'action des agents agressifs, les domaines à surveiller plus particulièrement se déduisent des caractéristiques des

- The use of low steel stresses in reinforcement, see Section 3.3.1.
- Careful attention to joints, to avoid uncontrolled cracking elsewhere, see Section 3.3.1.
- The use of mass concrete rather than thin reinforced sections, see Section 3.3.1. [8].
- Adequate cover to reinforcement, see below.
- Avoidance of specifying areas of porous backfill, see Section 3.3.1.
- Adequate ventilation in galleries, see Section 3.3.4.
- Care in dealing with highway drainage flows where de-icing salts may be used, see Section 3.3.3.
- The possible allowance of sacrificial layers of concrete over and above that needed structurally.
- Possible use of protective membranes or barriers where pressure differentials exist, eg. across retaining walls, or in areas of flowing water, see also Section 6.5 below.

The use of pre-casting, for example of conduits within the body of a dam, is recommended as the control which can be exercised in pre-casting is generally superior to that possible on site. Precast concrete is generally, therefore, more durable [8]. Precast sections can also be cast, stored and cured adequately before they need come into contact with the aggressive environment.

Cover too is of vital importance in providing protection against attack to embedded reinforcement. Recommendations for minimum cover in aggressive environments vary, but are generally 50 to 75 mm. Given the monumental nature of dams and the eventual inevitability of concrete carbonation, this should be regarded as a minimum range.

Beeby [13] refers to an interesting experiment in which reinforced beams and slabs were sprayed with a 3 % salt solution for 2 years and the concrete then broken open to examine the degree of reinforcement corrosion. Concrete covers varied from 20 to 50 mm, steel stresses from 0 to 248 N/mm², water/cement ratios from 0.49 to 0.62 and bar diameters from 10 to 35 mm. It was found that the dominant variables were water/cement ratio, see Section 6.3, and the ratio of cover to bar diameter. When the ratio of cover to bar diameter was less than 1, reinforcement corrosion was 100 %, when the ratio was 3 or more the reinforcement corrosion was zero, see Fig. 4 and 5. The relevance of these findings to dams has also been referred to by Mason [32]. The study related particularly to chloride attack. Where leaching action is involved the steel stress levels and degree of cracking may also be considered relevant.

Lastly, as mentioned in Section 3.3.1, where low cement content mixes are employed in the construction of roller compacted concrete dams, particular attention should be placed, in aggressive environments, on waterproofing and on minimizing seepage, if the concrete is not to rapidly deteriorate.

6.4. SITE CONTROL

Once again, the areas in which site control can be especially attentive in order to minimize the dangers of aggressive attack follow logically from considering those

zones indiquées au paragraphe 3.3 ou mentionnées au paragraphe 6.3. On peut citer :

— Contrôle très strict de la qualité de la composition et de la fabrication du béton (voir paragraphe 6.2 et le commentaire du Comité 201 de l'ACI cité au paragraphe 3.3. Voir également le Bulletin 47 de la CIGB « Contrôle de la qualité du béton »).

— Mise en place et compactage soignés du béton pour obtenir un béton dense. Cela est particulièrement important autour des waterstops et dans les zones fortement armées.

— Recouvrement suffisant des armatures, en utilisant éventuellement des entretoises ou des cales. En cas de cales en mortier, celui-ci devra être imperméable et d'excellente qualité. Davis [1] déconseille l'utilisation de cales en acier, bois, plastique ou résine époxy, en milieu agressif.

— Préparation soignée des reprises de bétonnage (surface des levées) et des joints secs. Compte tenu du risque de percolations qu'ils présentent, une couche de mortier ou de microbéton peut être bénéfique. En milieu agressif, il est primordial de s'assurer de l'excellente qualité de telles couches pour éviter les effets nuisibles [33].

— Préparation soignée des surfaces des fondations rocheuses, avec application de couches de béton de propreté de bonne qualité présentant les mêmes caractéristiques générales et de résistance aux agents agressifs que le béton de l'ouvrage. Par exemple, si un ciment résistant aux sulfates est imposé pour le béton principal, les couches d'assise doivent impérativement être constituées du même ciment (voir Annexe A « Barrage d'Aigueblanche en France »).

— Élimination des remblais perméables (paragraphe 3.3.1 et 6.3); si nécessaire, mise en place du béton directement au contact avec la paroi de la fouille.

— Non-utilisation de matériaux de récupération (débris de briques, clinker, cendres...) pour les remblais, ou également pour d'autres ouvrages, sans essais préalables (paragraphe 3.2.6).

6.5. ÉCRANS ET REVÊTEMENTS

Les enduits d'étanchéité ou les masques sont largement utilisés pour la réparation des parements de barrages déjà endommagés. Il s'agit de gunite, de néoprène, de résines et de masques en béton armé ancrés (voir chapitre 8.2 « Travaux de réparation »).

Lorsqu'une agression est prévue et qu'elle est jugée assez importante pour justifier l'utilisation d'une étanchéité appliquée sur le parement amont du barrage, le matériau utilisé couramment est le bitume. Le niveau de protection offert par le bitume est discuté. Dès 1933, Link [34] note ses performances médiocres sur les barrages en Allemagne. Lea [5] décrit des essais au cours desquels divers enduits : bitume de goudron et bitume acide appliqués à chaud, solutions bitumineuses appliquées à froid, résine de formaldéhyde de phénol, se sont désagrégés après un séjour de 7 ans dans de l'eau de marécage. Il note que, si la peinture bitumineuse peut être efficace, l'émulsion bitumineuse ne l'est pas. Campbell et al. [7] décrivent la grande utilisation d'enduits bitumineux sur les parements amont de barrages

areas outlined in Section 3.3 and in some cases mentioned above in Section 6.3. They include :

- Strict control of concrete production and mix quality, see Section 6.2 and in particular the comment attributed to ACI Committee 201 in Section 6.2.3. See also ICOLD Bulletin 47, “ Quality Control of Concrete ”.

- Careful attention to concrete placing and compaction, to ensure dense sound concrete. This is especially important around waterstops and areas of dense reinforcement.

- The provision of correct covers to reinforcement using spacers if necessary. Where mortar spacers are used the mortar should be of high quality and impermeable. Davis [1] specially recommends against the use of steel, timber, plastic or epoxy spacers in aggressive conditions.

- The careful preparation of concrete lift surfaces and cold joints. Given that these represent potential seepage paths some benefit can be obtained by the use of mortar or microcrete layers. In aggressive environments it is vital to ensure that such layers are of high quality mixes or the result can be detrimental [33].

- The careful preparation of rock surfaces and blinding layers with good quality mixes with the same general characteristics and resistance to aggressive agents as the main concrete to follow. For example, if sulphate resisting cement is specified for the main concrete, it is equally important to use sulphate resisting cement in blinding and bedding layers, see Appendix A, Aigueblanche dam in France.

- The avoidance of porous backfill, see Sections 3.3.1 and 6.3; casting concrete directly against the excavation if necessary.

- The avoidance of clinker, ash or brick rubble as backfill, or elsewhere in the construction without careful testing of the material beforehand, see Section 3.2.6.

6.5. BARRIERS AND FACINGS

The most widespread use of waterproofing barriers or facings occurs as remedial works to the faces of dams which have already deteriorated. They include the use of gunite, neoprene, resins and anchored reinforced concrete facing walls. These are dealt with as remedial works in Section 8.2.

Where attack is anticipated before construction takes place and the aggression is considered sufficient to warrant the use of a barrier coating on the main dam wall, the most commonly used material is bitumen. Opinions vary on the effectiveness of bitumen facings. As early as 1933, Link [34] referred to its disappointing performance on dams in Germany. Lea [5] describes tests in which coatings of hot dip tar asphalt, hot dip acid asphalt, cold bituminous solutions and phenol formaldehyde resin broke down after 7 years of exposure in marsh water. He further states that whereas bitumen paint can be effective, bituminous emulsion is not. Campbell et al [7] describe the widespread use of bitumen coatings on the upstream faces of dams in Scotland. These appear to have been successful, but require regular maintenance at

écossais. Les performances semblent bonnes, mais des travaux d'entretien sont nécessaires tous les 7 à 10 ans, ce qui n'est évidemment possible que lorsque la retenue peut être vidangée. Ces auteurs notent également que, pour des raisons d'esthétique, l'enduit est arrêté au-dessous du niveau de retenue normale, alors que le risque d'agression est souvent très important dans la zone supérieure, atteinte par les projections d'eau. Ces revêtements ne sont plus renouvelés, les dépenses n'étant pas jugées justifiées par le niveau de détérioration probable de la paroi non protégée. En résumé, l'enduit bitumeux est relativement peu onéreux, mais il nécessite un entretien régulier. De plus, un meilleur niveau de protection peut vraisemblablement être obtenu en améliorant la qualité du béton du parement.

Un procédé différent a été suivi au barrage-voûte de Victoria, au Sri Lanka ($h = 122$ m); il s'agit d'un enduit avec imprégnation chimique, appliqué pendant la montée des bétons. Le principe est le suivant : les percolations entraînent les matières chimiques à l'intérieur du béton où elles se transforment en composés insolubles, bouchant les vides et empêchant ainsi la progression des écoulements internes. Cet enduit fut appliqué sur tout le parement amont du barrage, sur le bord amont des surfaces des levées (largeur de 500 mm) et dans tous les conduits hydrauliques, comprenant la galerie d'alimentation en eau, de 6 km de longueur. Le but est de ralentir l'agression plutôt que de l'éliminer. L'avantage de ce procédé est son faible coût par rapport aux résines époxy, par exemple. Le personnel du chantier estime également que le fait d'appliquer l'enduit systématiquement à chaque décoffrage est, en lui-même, une garantie de bonne qualité, les défauts éventuels, par exemple aux reprises, étant réparés immédiatement.

Il existe d'autres produits d'étanchéité, tels que le polyéthylène « 500 microns », pour les ouvrages annexes, par exemple murs de soutènement. Le rapport rédigé par le Comité 515 de l'ACI est un guide complet sur les enduits et autres produits résistants à la corrosion, destinés à la protection du béton contre les agressions chimiques [8].

6.6. TRAITEMENT DE L'EAU

Le traitement de l'eau de la retenue afin de réduire son agressivité est une entreprise colossale et n'est pas toujours viable. Cependant, au barrage de Tamagawa (Japon) [35], les apports provenant de sources thermiques sont très acides et l'on prévoit des déversements de calcaire dans la rivière, à l'amont de la retenue, pour neutraliser cette acidité. Aux Seychelles, le corail est utilisé pour neutraliser l'eau douce à l'entrée des ouvrages de traitement des eaux. En Scandinavie et au Canada, on connaît des lacs dont les eaux acides sont neutralisées par la chaux et, au Pays de Galles, des sacs de coquilles d'huîtres permettent de traiter les eaux acides de certains cours d'eau.

Un traitement de l'eau est parfois nécessaire pour éviter les dépôts carbonatés dans les puisards de drainage (paragraphes 5.2 et 8.5).

6.7. UTILISATION DES TERRES

Dans les zones soumises aux pluies acides, les plantations de résineux risquent d'augmenter l'acidification des lacs (paragraphe 2.5). Les plantations projetées ou

7 to 10 year intervals, which is of course only possible if the reservoirs can be drawn down. They also noted that, for aesthetic reasons, the coatings stopped below reservoir full supply level, whereas it is often the upper, splash, zones which are most susceptible to attack. Renewal of these coatings is now no longer carried out as it is considered that the cost involved is not warranted by the level of surface deterioration likely to occur without them. To summarize, bitumen painting is relatively inexpensive, but its use on main dam walls requires regular maintenance. Furthermore the degree of protection afforded is probably better achieved by improving the quality of the upstream facing concrete.

An alternative, used on the 122 m high Victoria arch dam in Sri Lanka, consisted of a chemically impregnated rendering which was applied as construction proceeded. It operates on the principle that seepage flows would take the chemicals concerned into the main concrete where they form insoluble compounds, blocking pores and preventing further ingress. The rendering was applied over the entire upstream face of the dam, on the upstream 500 mm of all main concrete lift surfaces and in all water passages including the main 6 km long water supply tunnel. It represents a delaying approach which slows attack considerably rather than preventing it completely and is inexpensive compared to, for example, epoxy resin systems. It was also considered by the site staff that the discipline of applying the rendering, as the forms were removed, ensured in itself that any defects in the concrete, for example at lift joints, were made good, and that this alone had considerable beneficial effect.

Many other barrier systems, such as 500 micron polythene, can be used to protect ancillary structures such as retaining walls. ACI Committee 515 has prepared a comprehensive guide to the protection of concrete against chemical attack by means of coatings and other corrosion resistant materials [8].

6.6. WATER TREATMENT

The treatment of reservoir water to reduce aggression represents a mammoth undertaking and is not generally viable. At the Tamagawa dam in Japan [35], however, the water entering the reservoir is highly acidic and emanates from hot springs. The dumping of limestone into the river upstream of the reservoir is envisaged in order to neutralize this. In the Seychelles, coral is used to neutralize soft water entering water treatment works. In Scandinavia and Canada, acidic lakes have been successfully neutralized by the addition of lime and in Wales acidic streams have been treated by the use of bagged oyster shells.

Water treatment may also be necessary in drainage sumps to deal with scaling by carbonate deposits, see Sections 5.2 and 8.5.

6.7. LAND USE

It was mentioned in Section 2.5 that in areas of acid rain, acidification of lakes can be increased by the introduction of conifer plantations. Care should therefore

existantes sont à surveiller attentivement et devraient être éloignées des abords de la retenue sur une certaine distance.

6.8. EAU DE MER

On a déjà dit que les barrages risquaient peu d'être exposés au problème d'eau de mer, sauf ceux destinés à maîtriser les effets des marées (voir paragraphes 3.2.7. et 3.2.8). De plus, il existe une documentation abondante sur les bétons résistant à l'eau de mer. Les moyens disponibles, résumés par Lea [5], sont les suivants :

- dosage en ciment supérieur ou égal à 360 kg/m^3 , et d'au moins 400 kg/m^3 dans la zone de projection d'eau;
- E/C inférieur à 0,45, ou 0,40 si possible;
- béton très dense, à faible perméabilité;
- réduction du nombre de reprises de bétonnage;
- armatures éloignées des parois d'au moins 60 mm (75 mm dans la zone de projection d'eau). Voir également les travaux de Beeby [13] au paragraphe 6.3 ci-dessus.

6.9. APPAREILS DE MESURES ET AUSCULTATION

L'auscultation et la surveillance correspondent à un moyen préventif lorsqu'il s'agit de détecter les débuts de détérioration, ce qui permet la mise en œuvre d'autres moyens préventifs avant que des travaux de réparation importants deviennent nécessaires.

L'auscultation et la surveillance comprennent :

- des contrôles visuels à intervalles réguliers;
- des mesures des débits de percolation pour déceler les augmentations ou diminutions;
- des mesures des sous-pressions;
- des analyses chimiques des eaux de percolation, avec comparaison avec l'eau de la retenue (paragraphe 7.5).

En cas de risque d'agression, il est peut-être prudent de prévoir, dès le début, une série d'essais (ultrasons, sclérométrie), en vue de comparaisons ultérieures. De même, on peut conserver un certain nombre d'échantillons du béton utilisé pour l'ouvrage, destinés à des essais comparatifs ultérieurs (paragraphes 7.3, 7.8 et 7.9 ci-dessous).

be exercised, either when conifers exist or are to be introduced, and it is suggested in either event that they be kept clear from the immediate margins of the reservoir.

6.8. SEAWATER

As mentioned in previous sections, the dam Engineer is likely to meet seawater only when involved on tidal barrage schemes, although see also Sections 3.2.7. and 3.2.8. Furthermore ample guidance exists elsewhere on designing concrete to withstand the effects of seawater. They are summarised by Lea [5] as :

- Using cement contents of 360 kg/m^3 or more, and not less than 400 kg/m^3 in the splash zone.
- Using water/cement ratios of less than 0.45, or 0.40 if possible.
- Ensuring high density, low permeability concrete.
- Minimizing the number of construction joints.
- Using minimum covers to reinforcement of 60 mm, with 75 mm in the splash zones. See also Section 6.3 regarding the work by Beeby [13].

6.9. INSTRUMENTATION AND MONITORING

Instrumentation and monitoring can be regarded as a preventive measure where it is used for the early identification of problems and hence allows other preventive measures to be taken before major remedial works become necessary.

Aspects which should be covered include :

- Regular visual inspections.
- Monitoring of seepage flows with regard to gradual increases or decreases.
- Monitoring uplift pressures.
- The chemical analyses of seepage flows and their comparison to similar analyses of reservoir water, see Section 7.5.

Where aggressive attack is anticipated it might also be considered prudent to carry out a reference set of ultrasonic and Schmidt hammer tests for future comparison. Similarly representative concrete specimens can be stored for future comparative test purposes, see Sections 7.3, 7.8 and 7.9.

Tableau J. — Relation entre le type de ciment et les caractéristiques du béton

Type de ciment	Vitesse de durcissement	Résistance initiale	Gain de résistance à 28 jours	Chaleur initiale	Résistance au lessivage	Résistance aux sulfates	Sensibilité aux basses températures	Possibilité d'utilisation pour les barrages en béton
A. Ciments Portland sans constituants secondaires								
1. Ciment Portland extra prompt	très rapide	très élevée	négligeable	très élevée	médiocre	médiocre	nulle	non
2. Ciment Portland prompt	rapide	élevée	léger	élevée	médiocre	médiocre	nulle	non
3. Ciment Portland artificiel (CPA)	moyenne	moyenne	moyen	assez élevée	ass. médiocre	ass. médiocre	moyenne	moyenne
4. Ciment Portland à chaleur d'hydratation modérée	assez lente	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	bonne
5. Ciment Portland résistant aux sulfates	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	bonne	très bonne	sensible	bonne
6. Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation	lente	faible	grand	faible	bonne	bonne	sensible	excellente
7. Ciment Portland à très faible chaleur d'hydratation	très lente	très faible	très grand	très faible	bonne	très bonne	très sensible	excellente
8. Ciment Portland blanc	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	moyenne	moyenne
9. Ciment Portland coloré	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	moyenne	moyenne
10. Ciment Portland hydrophobe	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	moyenne	moyenne
B. Ciments contenant du laitier de haut fourneau								
1. Ciment Portland de laitier 10-20	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	ass. médiocre	moyenne	moyenne
2. Ciment Portland de laitier 20-35	moyenne	faible	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	sensible	bonne
3. Ciment Portland de laitier 35-60	assez lente	faible	grand	faible	bonne	bonne	très sensible	bonne
4. Ciment Portland de laitier 60-80	assez lente	faible	très grand	faible	très bonne	très bonne	très sensible	excellente
5. Ciment Portland de laitier 85	lente	faible	très grand	très faible	très bonne	très bonne	très sensible	excellente
6. Ciment sursulfaté	lente	faible	très grand	très faible	très bonne	très bonne	sensible	excellente
7. Ciment de laitier à la chaux	lente	faible	moyen	faible	bonne	bonne	très sensible	moyenne
C. Ciments contenant des pouzzolanes								
1. Ciment Portland-pouzzolane 10-20	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	ass. médiocre	moyenne	moyenne
2. Ciment aux pouzzolanes 20-40	assez lente	faible	grand	faible	bonne	moyenne	sensible	bonne
D. Autres ciments								
1. Ciment fondu	très rapide	très élevée	négligeable	très élevée	bonne	très bonne	nulle	non
2. Ciment à prise contrôlée	très rapide	très élevée	moyen	élevée	moyenne	médiocre	nulle	non
3. Ciment expansif de type K	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	sensible	éventuel
4. Ciment expansif de type S	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	médiocre	médiocre	sensible	éventuel
5. Ciment expansif de type M	moyenne	moyenne	moyen	assez élevée	médiocre	médiocre	sensible	éventuel
6. Ciment à maçonner	assez lente	moyenne	moyen	moyenne	médiocre	médiocre	sensible	non
7. Ciment naturel	assez lente	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	ass. médiocre	sensible	moyenne

Table J. — Relationship between cement type and characteristics of concrete

Type of cement	Rate of hardening	Early strength	Strength gain after 28 days	Early rate of heat evolution	Resistance to leaching	Resistance to sulphate attack	Sensitivity to low temperature	Applicability for massive dams
A. Portland Cements without Secondary Constituents								
1. Extra-Rapid-Hardening Portland Cement	very rapid	very high	negligible	very high	poor	poor	insensitive	unsuited
2. Rapid-Hardening Portland Cement	rapid	high	small	high	poor	poor	insensitive	unsuited
3. Ordinary Portland Cement	moderate	moderate	moderate	fairly high	fairly poor	fairly poor	moderate	usable
4. Moderate-Heat Portland Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	appropriate
5. Sulphate-Resisting Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	good	very good	sensitive	appropriate
6. Low-Heat Portland Cement	slow	low	considerable	low	good	good	sensitive	well-suited
7. Extra-Low-Heat Portland Cement	very slow	very slow	great	very low	good	very good	very sensitive	well-suited
8. White Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
9. Coloured Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
10. Hydrophobic Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
B. Cements containing Blast furnace Slag								
1. Portland-Blast furnace Cement 10-20	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	fairly poor	moderate	usable
2. Portland-Blast furnace Cement 20-35	moderate	low	moderate	moderate	moderate	moderate	sensitive	appropriate
3. Portland-Blast furnace Cement 35-60	fairly slow	low	considerable	low	good	good	very sensitive	appropriate
4. Portland-Blast furnace Cement 60-80	fairly slow	low	great	low	very good	very good	very sensitive	well-suited
5. Portland-Blast furnace Cement 85	slow	low	great	very low	very good	very good	very sensitive	well-suited
6. Supersulphated Cement	slow	low	great	very low	very good	very good	sensitive	well-suited
7. Lime-Slag Cement	slow	low	moderate	low	good	good	very sensitive	usable
C. Cements containing Pozzolana								
1. Portland-Pozzolana Cement 10-20	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	moderate	usable
2. Pozzolanic Cement 20-40	fairly slow	low	considerable	low	good	moderate	sensitive	appropriate
D. Other Cements								
1. High-Alumina Cement	very rapid	very high	negligible	very high	good	very good	insensitive	unsuited
2. Regulated-Set Cement	very rapid	very high	moderate	high	moderate	poor	insensitive	unsuited
3. Expansive Cement Type K	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	sensitive	conditional
4. Expansive Cement Type S	moderate	moderate	moderate	moderate	poor	poor	sensitive	conditional
5. Expansive Cement Type M	fairly slow	moderate	moderate	fairly high	poor	poor	sensitive	conditional
6. Masonry Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	poor	poor	sensitive	unsuited
7. Natural Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	fairly poor	fairly poor	sensitive	usable

Tableau K. — Durée de cure nécessaire à l'obtention de discontinuités capillaires

Rapport E/C	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	> 0,70
Temps nécessaire (jours)	3	7	14	180	365	impossible

Table K. — Duration of curing for capillary discontinuity

Water/Cement Ratio	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	> 0.70
Time required (days)	3	7	14	180	365	impossible

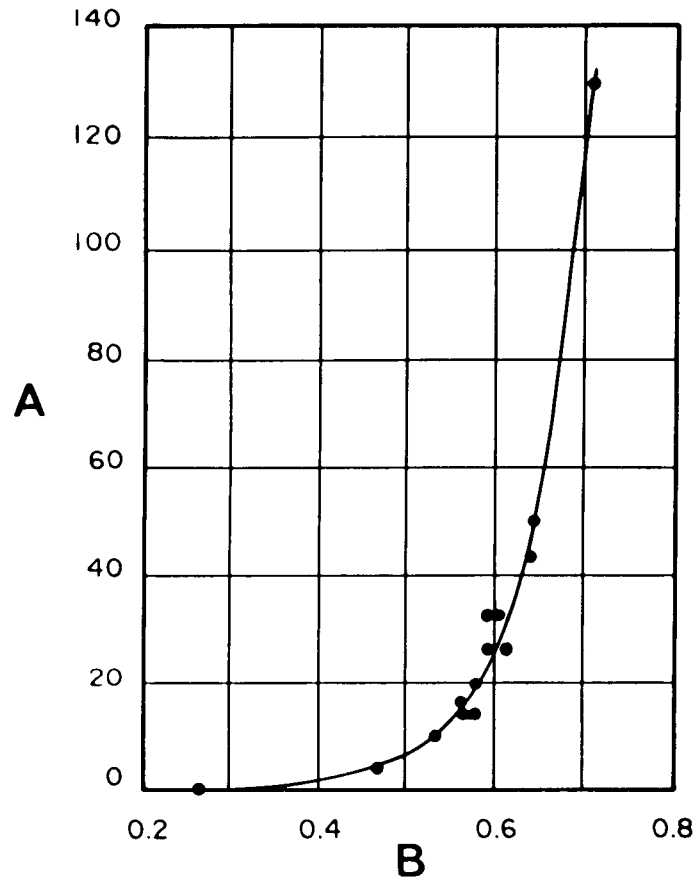


Fig. 3

Effect of water-cement ratio on permeability of mature cement paste.

Influence du rapport E/C sur la perméabilité du ciment durci.

(A) Permeability (10^{-11} mm/s).

(A) Perméabilité (10^{-11} mm/s).

(B) Water-cement ratio.

(B) Rapport E/C.

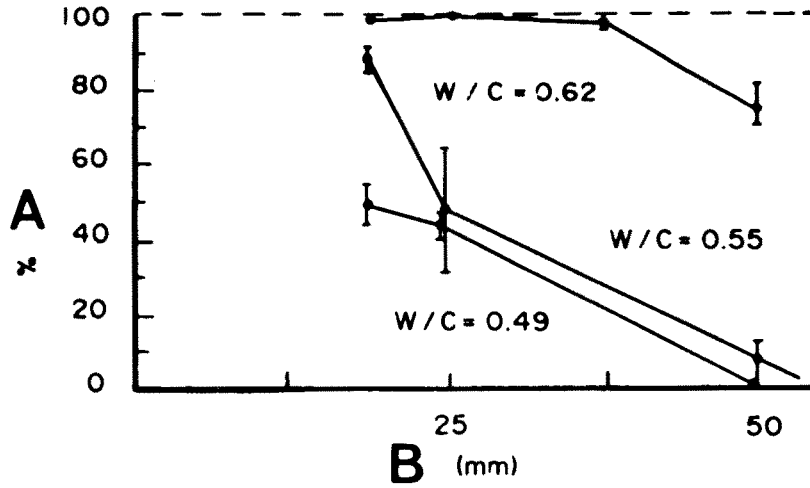


Fig. 4

Influence of water-cement ratio on corrosion of 20 mm bars.

Influence du rapport E/C sur la corrosion des armatures (Ø 20 mm).

(A) Corrosion (%).

(A) Corrosion (%).

(B) Cover (mm).

(B) Recouvrement (mm).

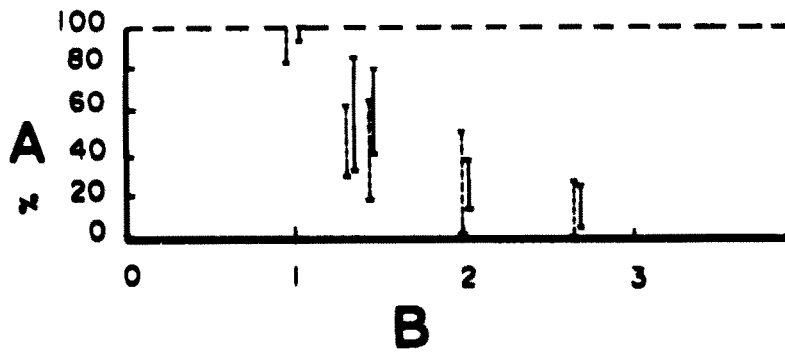


Fig. 5

Influence of cover to bar diameter ratio on corroded area of reinforcement (W/C = 0.55).

Influence du rapport recouvrement/diamètre des armatures sur la surface atteinte par la corrosion (E/C = 0,55).

(A) Corrosion (%).

(A) Corrosion (%).

(B) Ratio cover/bar diameter.

(B) Rapport recouvrement/diamètre des armatures.

— Stressed beams.

— Poutres avec contraintes.

--- Unstressed beams.

--- Poutres sans contraintes.

7. ENQUÊTES SUR DES BARRAGES EXISTANTS

7.1. INTRODUCTION

Les enquêtes sur des barrages existants sont destinées à vérifier s'ils sont soumis à l'action d'agents agressifs, ou à déterminer l'importance et la nature des dégâts avant la définition des travaux de réparation.

7.2. EXAMEN VISUEL

La première étape consiste en un examen visuel complet des ouvrages. Les observations sont relevées et notées avec le plus grand soin en se limitant rigoureusement aux constatations réelles. En effet, comme le soulignent Fristrom et Sallstrom [14], l'étendue des efflorescences à la surface du béton peut laisser supposer une détérioration bien plus importante qu'elle ne l'est dans la réalité. Avant toute définition des travaux de réparation à entreprendre, une étude plus poussée est nécessaire (voir également paragraphe 7.12).

7.3. ANALYSE DES RELEVÉS

L'analyse des relevés, s'ils existent, peut indiquer des modifications du comportement de l'ouvrage : augmentation ou diminution des débits de drainage, augmentation des sous-pressions... Les relevés anciens des essais de résistance du béton sont à comparer aux résultats obtenus sur carottes nouvellement prélevées. S'il existe toujours des échantillons du béton fabriqués lors de la construction du barrage, on peut procéder à des comparaisons des résistances par mesures directes ou par ultrasons (paragraphe 7.8, ci-dessous).

7.4. ESSAIS DE COLORATION

Un essai à la fluorescéine est utile pour tracer les chemins de fuites [21].

7.5. ANALYSE DE L'EAU

Les critères à retenir pour les analyses de l'eau sont précisés au chapitre 4, mais il importe de souligner l'importance de ces analyses. Elles permettent d'identifier les matières potentiellement nuisibles et de cerner le risque. Aux barrages existants, il est très intéressant d'analyser l'eau de la retenue et celle provenant de fissures, de joints, de réseaux de drainage. Au barrage de Victoria (Sri Lanka), l'eau de la retenue

7. INVESTIGATIONS AT EXISTING DAMS

7.1. INTRODUCTION

Investigations may be carried out at existing dams either to ascertain whether or not aggressive attack is taking place or to establish the extent and nature of such attack as a prelude to planning remedial work.

7.2. VISUAL INSPECTION

It is perhaps obvious, but nevertheless necessary, to state that a first step must be to carry out a thorough visual inspection of the structures concerned. All relevant features should also be meticulously mapped and recorded. Particular care should be taken, to ensure that such records are strictly factual. Fristrom and Sallstrom of Sweden [14] make the point that extensive efflorescence deposits on a concrete surface may greatly exaggerate the extent to which deterioration has in fact occurred. Certainly before any remedial works are proposed, more extensive investigations should be carried out. See also Section 7.12 on Gas Detection.

7.3. EXAMINATION OF RECORDS

Examinations of records, if available, may reveal changes in behaviour, such as increased or decreased drainage flows or increased uplift pressures. Early records of concrete strengths may be useful for correlation against new cored specimens while retained concrete samples from the original construction can also be useful either for direct strength comparison or non-destructive ultrasonic test comparisons, see Section 7.8.

7.4. DYE

The use of dyes such as fluorescein may be useful in establishing leakage paths [21].

7.5. WATER ANALYSIS

Detailed requirements for water analysis are covered in Chapter 4 but mention is made here to emphasize its importance. Potentially harmful substances will be identified and the potential seriousness of the problem more readily assessed. At existing dams it is particularly useful to make analyses of both reservoir water and water issuing from cracks, fissures, joints and drainage curtains. At Victoria dam in

renfermait des matières solides dissoutes à raison de 100 ppm, la teneur étant beaucoup plus élevée dans les débits de percolation. On en a déduit un lessivage dans le barrage et dans le rideau d'injection. Ailleurs, des pertes totales atteignant plusieurs centaines de kilogrammes de ciment par an ne sont pas rares (voir paragraphe 5.1).

Dans le cas de retenues existantes, il y a lieu également de souligner que des échantillons d'eau doivent être prélevés en divers points et profondeurs de la retenue, et à diverses époques (voir paragraphe 4.4).

7.6. PRÉLÈVEMENT DE CAROTTES

Bien qu'onéreux, le prélèvement de carottes est nécessaire à toute étude sérieuse. On peut le limiter à certaines zones seulement pour l'étalonnage des forages par percussion ou des essais aux ultrasons (voir paragraphes 7.7 et 7.8 ci-dessous), ceux-ci étant moins coûteux et destinés à apporter des renseignements moins ponctuels.

Généralement, le carottage se fait au diamètre de 100 à 150 mm [14] et les essais à prévoir portent sur les caractéristiques suivantes :

- densité;
- résistance à la compression;
- résistance à la traction;
- module d'élasticité;
- vitesse des ultrasons;
- alcalinité;
- analyse pétrographique;
- porosité;
- perméabilité;
- analyse chimique en vue de détecter une perte de ciment ou une détérioration.

En outre, on peut procéder, dans le forage, à des essais de perméabilité par tranche et à des examens visuels grâce à des caméras.

Dans tous les cas sus-mentionnés, l'essai de référence sur un béton non altéré fournira un repère particulièrement utile pour évaluer le degré de détérioration (voir paragraphes 7.3, 7.8 et 7.9). Lorsqu'il s'agit d'un béton à gros granulats, des carottes d'un diamètre de 300 mm ou plus peuvent s'avérer nécessaires pour vérifier la résistance, bien que les essais faits sur des carottes extraites d'une maçonnerie ou d'anciens barrages en béton mal exécutés puissent être difficiles à interpréter du fait du manque d'homogénéité.

7.7. FORAGES PAR PERCUSSION

Le carottage peut être complété par des forages par percussion, moins onéreux. Les résultats obtenus sont moins sûrs; cependant on déduit la qualité du béton d'après les paramètres de forage (vitesse d'avancement), l'examen du matériau extrait fait par un expert et les essais de perméabilité éventuels dans les trous de forage.

Sri Lanka the reservoir water typically contained 100 ppm of dissolved solids which rose to several times this in seepage flows. This clearly indicated that material was being leached from both the dam and grout curtain. In similar cases total losses of several hundred kilogrammes of cement per year are not uncommon, see Section 5.1.

In the case of existing reservoirs it is also stressed that samples may need to be taken over a range of reservoir locations and depths and at various times, see Section 4.4 for more detailed discussion.

7.6. CORE DRILLING

Core drilling is an expensive but necessary part of any comprehensive programme of investigations. It may be restricted to selected areas to assist calibration of percussion drilling or ultrasonic tests, see Sections 7.7 and 7.8, with these latter, less expensive, techniques being used to generate a wider picture.

Cores of 100 to 150 mm diameter are normal [14] and tests which can be carried out on them include :

- Density
- Compressive strength
- Tensile strength
- Modulus of elasticity
- Ultrasonic velocity
- Alkalinity
- Petrographic analyses
- Porosity
- Permeability
- Chemical analysis to detect cement loss or deterioration

The drill hole can further be stage-tested for permeability and examined by down-the-hole camera techniques.

In all the above cases, reference testing of unaffected concrete will provide a particularly useful benchmark from which to gauge the degree of deterioration, see Sections 7.3, 7.8 and 7.9. In cases of large aggregate concrete, cores of 300 mm diameter or larger may be deemed necessary for strength testing purposes, though tests on cores from masonry or old, poorly concreted, dams may, in any case, be difficult to evaluate due to dishomogeneity problems.

7.7. PERCUSSION DRILLING

Percussion drilling can be used as a cheaper adjunct to core drilling. Results will be less reliable, nevertheless, an idea of concrete quality can be obtained from drilling rates and from the observations of an experienced driller. Permeability tests can also be carried out in the drill holes.

7.8. MESURES AUX ULTRASONS

La mesure de la vitesse des ultrasons dans le béton, d'un coût relativement faible, est non destructive et permet de relier cette vitesse au module d'élasticité (E), à la densité (ρ) et au coefficient de Poisson (μ) du béton. La relation la plus courante s'écrit :

$$V^2 = \frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

Il est à noter que la corrélation directe avec la résistance mécanique du béton peut nécessiter des essais comparatifs, puisque les bétons à très faible valeur de E donnent également une faible valeur pour la vitesse des ultrasons. Un tel béton peut être néanmoins acceptable, car il s'adapte mieux aux mouvements sans se fissurer. Cependant, il existe une corrélation générale entre la vitesse et l'état du béton, celle la plus couramment acceptée [36] étant :

Vitesse (m/s)	État du béton
> 4 600	Excellent
3 650 à 4 600	Bon dans l'ensemble
3 050 à 3 650	Douteux
2 100 à 3 050	Médiocre dans l'ensemble
< 2 100	Mauvais

Pour des vitesses inférieures à 1 500 m/s, les carottes obtenues sont rarement intactes.

Le plus souvent, un béton détérioré se traduit par une grande dispersion des résultats, plutôt que par des vitesses systématiquement faibles [9, 36]. Mais, une étude comparative avec les résultats antérieurs (s'ils existent) est le moyen le plus sûr de détecter la détérioration. McHenry et Oleson [36] notent les avantages de disposer de toute une série de mesures retraçant la vie de l'ouvrage. Au barrage de Norris (États-Unis), ils ont démontré l'absence de détérioration grâce aux bonnes corrélations entre les mesures de vitesses à travers l'ouvrage et celles à travers des échantillons cylindriques de béton, qui avaient été conservés en atmosphère humide, à 21 °C, pendant 20 ans.

D'autre part, Pirtz a montré que le béton situé sous le niveau de retenue normale au barrage de Drum Afterbay (États-Unis) présentait une vitesse sensiblement inférieure à celle correspondant au béton situé au-dessus de ce niveau [9]. L'examen pétrographique des carottes a révélé que le premier, soumis à l'action des percolations, présentait des signes de détérioration : lessivage, agression par les sulfates, réaction alcali-granulats. Ultérieurement, ce barrage fut abandonné (voir paragraphe 5.1 et Annexe A). De même, Campbell et al. ont décelé des variations de résistance mécanique entre les parties supérieure et inférieure de barrages, à l'aide d'essais sclérométriques Schmidt (voir paragraphe 7.9 ci-dessous).

Enfin, il faut noter que de telles mesures de vitesse sont impossibles en cas de fissuration ou de décollement du revêtement en gunite ou en béton projeté du barrage.

7.9. MESURE AU SCLÉROMÈTRE SCHMIDT

L'essai sclérométrique (appareil Schmidt) est principalement utile pour mettre

7.8. ULTRASONIC TESTING

Ultrasonic pulse velocity testing is relatively inexpensive, is non-destructive and relates pulse velocity measurements through concrete to the concrete modulus of elasticity, E , density, ρ and Poisson's ratio, μ . The commonly accepted formula linking these parameters [36] is :

$$V^2 = \frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

It should be noted that a direct correlation with concrete strength may only be possible after comparative tests have been made, as concretes with particularly low E values will also record low velocities. This may not be detrimental as such concretes will be more easily able to accommodate movement and resist cracking. Nevertheless a general link between pulse velocity and concrete condition does exist and is generally assumed [36] to be as follows :

Pulse Velocity (m/s)	Concrete Condition
above 4 600	Excellent
3 650-4 600	Generally good
3 050-3 650	Questionable
2 100-3 050	Generally poor
below 2 100	Very poor

At velocities below 1 500 m/s intact core retrieval is unlikely.

Deteriorated concrete is more likely to be revealed by a wide scatter of velocity measurements than by consistently low values [9, 36]. Deterioration is even more clearly evidenced where some form of comparison can be made. McHenry and Oleson [36] make the point that ideally a history of sonic measurements should be available for a structure. At Norris dam in the USA they were able to demonstrate that deterioration was not taking place by obtaining good correlations between velocity measurements through the structure and through test cylinders of the original concrete which had been stored at 21 °C in a fog room for 20 years.

Pirtz on the other hand demonstrated that concrete below reservoir full supply level at Drum Afterbay dam in the USA exhibited noticeably lower pulse velocities than similar concrete above reservoir full supply level [9]. Petrographic examination of cores showed that the lower concrete, which had been subjected to seepage flows from the reservoir, exhibited evidence of leaching, sulphate attack and alkali-aggregate reaction. The dam was later abandoned, see Section 5.1 and Appendix A. Similar variations in strength between upper and lower levels of dams were revealed by Campbell et al using Schmidt hammer testing, see Section 7.9.

Lastly it should be noted that measurements cannot be made across cracks or via gunite, or shotcrete, facings where they have debonded from the dam wall.

7.9. SCHMIDT HAMMER TESTING

Schmidt or Impact hammer testing is chiefly useful for revealing localised,

en évidence les zones superficielles et localisées de béton défectueux. Cependant, cet essai est simple, peu onéreux et complète les autres moyens d'investigation.

Campbell et al. [7] ont fait une étude particulièrement intéressante lors du contrôle de 26 barrages en béton, en Écosse. Si, de toute évidence, la partie supérieure, plus mince, de ces ouvrages souffrait des effets des cycles de gel-dégel et des variations thermiques, ces auteurs ont indiqué que les détériorations dues à l'eau douce seraient plus facilement décelables en partie basse. En effet, les percolations se dirigeaient par gravité vers le bas, où les gradients de pression seraient les plus forts. De plus, selon eux, les ouvrages les plus anciens porteraient des traces de détériorations plus importantes. Ils ont mesuré l'importance de celles-ci dans les parties basses des ouvrages, les résultats sclérométriques (appareil Schmidt) étant exprimés en pourcentage des résultats obtenus en partie haute. Toutes ces mesures furent faites sur les parements aval des barrages. Les résultats sont consignés sur la Fig. 6; dans l'ensemble, ils semblent confirmer le raisonnement de ces auteurs (voir également les travaux de Pirtz au paragraphe 7.8 ci-dessus).

7.10. ESSAIS DE PERMÉABILITÉ *IN SITU*

Heggstad et Myran [20] décrivent l'utilisation d'une boîte en plastique, fixée sur le parement aval d'un barrage à contreforts type Ambursen (Norvège). Par ce moyen, l'eau, au lieu de disparaître sans trace par évaporation, est récupérée. Connaissant le débit de fuites, on en déduit le coefficient de perméabilité du béton. Des mesures à intervalles réguliers permettront de déceler toute détérioration progressive, mais même des mesures ponctuelles, faites sur un barrage ancien, apporteront des informations utiles sur l'étanchéité du béton et l'importance des fuites.

7.11. RELEVÉS GÉOLOGIQUES

Les relevés géologiques de la zone de la retenue sont utiles pour déceler les accidents risquant de devenir autant de chemins de percolation privilégiés, ainsi que la présence de matières nuisibles telles que les sulfates. Ces relevés sont également utiles pour définir les travaux de réparation.

7.12. DÉTECTION DE GAZ

Des poches de gaz résultant de l'attaque chimique sur le béton du barrage peuvent se former dans des zones non ventilées, telles que puisards de drainage ou extrémités de longues galeries (voir paragraphe 5.8). La détermination de la nature et de la concentration de tels gaz, au moyen d'appareils de détection appropriés, peuvent indiquer également le type d'attaque qui est à l'origine. Les gaz qui peuvent se présenter comprennent l'anhydride carbonique et l'acide sulfhydrique (voir chapitre 2).

La détection des gaz, ou des mesures de déficit en oxygène, sont, dans tous les cas, recommandés dans de telles zones comme mesures de sécurité. Si de telles mesures ne sont pas envisagées, on doit alors purger les zones avant d'y entrer.

surface areas of poor concrete. Nevertheless it is simple, inexpensive and is a useful adjunct to other forms of investigation.

Campbell et al [7] made particularly interesting use of Schmidt hammer testing when investigating the possible deterioration of 26 concrete dams in Scotland. Although the most obvious signs of distress were evident from freeze-thaw cycles and temperature movements in the upper, slender parts of the structures, they argued that concrete deterioration due to soft water attack would be more evident in the lower parts of the dams. Seepage water would tend to gravitate to these lower parts and the pressure differentials would also be greatest there. They also argued that older structures would be likely to show signs of greater deterioration. They measured the extent of deterioration in the lowest sections of dams by expressing Schmidt hammer results taken there as a percentage of similar results obtained at the tops of the same structures. All measurements were taken on the downstream faces of the dams. The results are shown on Fig. 6 and the general trend seem to justify their reasoning (cf. work by Pirtz discussed in Section 7.8).

7.10. *IN SITU* PERMEABILITY TESTS

Heggstad and Myran [20] outline the use of a plastic box attached to the downstream side of the main wall of an Ambursen buttress dam in Norway. Water which would normally evaporate from the downstream face without evidence of loss is instead condensed and collected. This enables total losses of this type to be assessed and the permeability coefficient of the concrete to be calculated. Regular measurements would indicate whether progressive deterioration was taking place. Even isolated measurements taken on an ageing dam will indicate whether the concrete is still sufficiently impermeable and whether water losses are significant.

7.11. GEOLOGICAL MAPPING

Geological mapping of the reservoir area will be useful in identifying joints and seams which could be major water carriers. Such mapping may also be useful for identifying sources of potentially harmful substances such as sulphates. It is a useful preliminary to the planning of any remedial works.

7.12. GAS DETECTION

Pockets of gas produced by any chemical attack on the dam concrete may accumulate in unventilated areas such as drainage sumps or ends of long galleries, see Section 5.8. Establishing the nature and concentration of such gases, by means of appropriate gas detectors, may be a useful secondary indication of which forms of attack are taking place. Typical gases which may be present would include carbon dioxide and hydrogen sulphide, see Chapter 2.

Gas detection, or oxygen deficiency measurements are, in any case, strongly recommended in such areas as a safety precaution. If such measurements are not envisaged then the areas should be purged before entering.

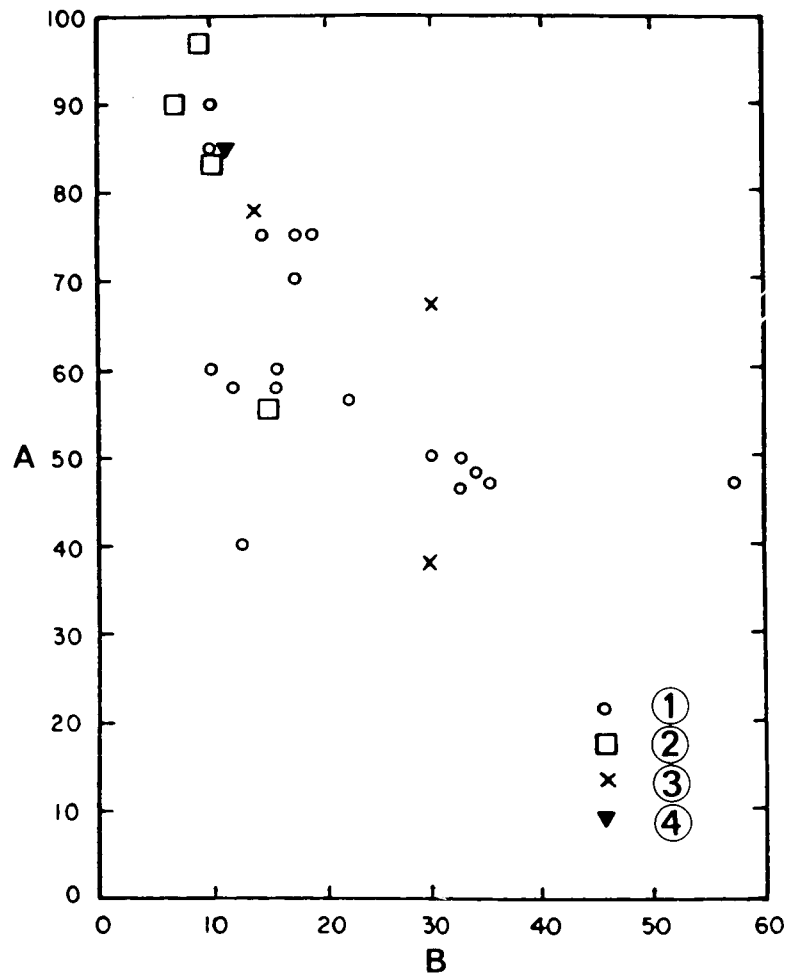


Fig. 6

Schmidt hammer strength ratios between the bases and crests of various Scottish dams as a function of age.

Barrages Écossais - Rapport des valeurs sclérométriques Schmidt entre la base et la crête du barrage, en fonction de l'âge de l'ouvrage.

(A) $\frac{\text{Schmidt hammer strength at base of dam}}{\text{Schmidt hammer strength at top of dam}} \times 100$

(A) $\frac{\text{Valeur sclérométrique Schmidt à la base du barrage}}{\text{Valeur sclérométrique Schmidt en crête du barrage}} \times 100$

(B) Age of dam (years).

(B) Age du barrage (années).

(1) Gravity dam.

(1) Barrage-poids.

(2) Buttress dam.

(2) Barrage à contreforts.

(3) Arch dam.

(3) Barrage-voûte.

(4) Prestressed dam.

(4) Barrage précontraint.

8. TRAVAUX DE RÉPARATION

8.1. GÉNÉRALITÉS

Un grand nombre de barrages ont fait l'objet de travaux de réparation à la suite de détériorations provoquées par le milieu agressif. Un certain nombre de cas figurent dans l'Annexe A. Ces travaux vont du simple « maquillage » des parois atteintes superficiellement, jusqu'au renforcement massif, ou même l'abandon de l'ouvrage (anciens barrages Suédois [14], barrage de Drum Afterbay [9]).

Les chapitres suivants indiquent des techniques de réparation (avec références) et présentent des commentaires sur l'efficacité de ces travaux ; des exemples valables y sont donnés.

8.2. RÉTABLISSEMENT DE L'ÉTANCHÉITÉ

Comme précisé ci-dessus, un des résultats des agressions est souvent la perte de liant, avec augmentation des percolations, soit à travers le corps du barrage (reprises de bétonnage, joints de retrait, fissures), soit à travers le rideau d'injection. Si la vidange de la retenue est impossible, il faut avoir recours à des injections, exécutées depuis l'aval ou depuis des galeries. Si la vidange est possible, on dispose de toute une série de techniques de réparation mises en œuvre depuis l'amont.

8.2.1. Enduits étanches

Pour améliorer l'étanchéité des plots d'un barrage, on peut appliquer divers revêtements sur le parement amont, mais seulement lorsque la vidange de la retenue est possible. Dans tous les cas, il est essentiel de préparer la surface avec soin (nettoyage, sablage, etc.) pour éliminer tous les matériaux altérés. Aucun enduit ne peut tenir sur un support suspect. Les enduits comprennent :

- le bitume ;
- le mastic bitumineux ;
- les enduits avec imprégnation chimique ;
- la gunite ou le béton projeté ;
- les revêtements synthétiques (élastomères de silicones, néoprène en émulsion, résines époxy, fibres de verre, etc.).

Le bitume seul n'est pas indiqué (voir paragraphe 6.5), à moins qu'il ne soit intercalé entre le parement et un masque ancré dans celui-ci (voir paragraphe 8.2.3.). Il en est de même pour le mastic bitumineux (voir exemple des réparations faites au barrage d'Agger en Allemagne [21]).

Les enduits avec imprégnation chimique (paragraphe 6.5) furent utilisés pour rétablir l'étanchéité du parement amont du barrage de Dinas (Pays de Galles). Les résultats initiaux furent satisfaisants, mais ne seraient que temporaires.

8. REMEDIAL WORKS

8.1. GENERAL

A significant number of remedial works have been carried out on dams throughout the world as a result of aggressive environment attack. A number of these are described in Appendix A. At the least they comprise cosmetic patching of etched concrete surfaces. At worst they comprise massive buttressing or abandonment (early Swedish dams [14], Drum Afterbay dam [9]).

The following sections outline some of the repair techniques available with references, comments on effectiveness and illustrated examples where appropriate and available.

8.2. WATERPROOFING

As mentioned in the earlier Chapters, one result of aggressive attack is often the removal of cementitious material and increased seepage losses through the dam. These can be directly through the dam wall (typically at the lift joints), at main contraction joints, at fissures and through grout curtains. Where the reservoir cannot be drawn down the only recourse is likely to be grouting from either the downstream side or from galleries. Where drawdown is possible a whole range of repairs can be effected from upstream.

8.2.1. Barrier Coatings

In order to enhance the impermeability of main dam blocks, various coatings can be applied to their upstream faces, but only where reservoir drawdown is possible. In all cases the importance must be stressed of cleaning and abrasive blasting the deteriorated face back to sound concrete. No barrier coating will remain intact if the substrate on which it is founded is suspect. Types of coating include :

- Bitumen
- Mastic Asphalt
- Impregnated renderings
- Guniting or shotcreting
- Synthetic facings such as Elastomeric Silicone, Neoprene Latex, Epoxy Resins, Fibreglass, PVC, etc.

Bitumen is unlikely to be effective (see Section 6.5) unless it is sandwiched by an anchored facing wall, see Section 8.2.3. The same applies to mastic asphalt, see for example the case history of repair for Agger dam in Germany [23].

Chemically impregnated renderings of the type described in Section 6.5 were used to waterproof the upstream face of Dinas dam in Wales. The immediate results were good but reported to be only temporary.

La gunite (ou béton projeté) armée est un moyen de réparation de barrages très courant, mais dans la majorité des cas sur lesquels on dispose d'informations son effet ne dure pas; il y a généralement perte d'adhérence sur de grandes surfaces et parfois désagrégation des plaques décollées. Tel fut le cas aux barrages de Drum Afterbay [9] et Delta [37] (États-Unis), Maentwrog (Pays de Galles) [33] et Suorva (Suède) [38]. Le décollement de la gunite est favorisé par des températures élevées. L'expérience italienne dans les Alpes où l'on signale qu'une gunite était restée efficace pendant 20 à 25 ans constitue une exception.

Les revêtements synthétiques (élastomères de silicones [39], néoprène en émulsion [38], résines époxy, etc.) ont été largement utilisés et ont fait l'objet d'un Bulletin de la CIGB [40] que l'on peut utilement consulter. Généralement, ces produits coûtent cher et leurs performances sont variables. Par exemple, au barrage de Suorva (Suède) [38], le néoprène était moins efficace que la résine époxy, notamment par suite des effets thermiques. Il est intéressant de noter que les réparations à la résine étaient d'un coût moins élevé que la construction d'un nouveau masque en béton, par suite du prix du transport de grandes quantités de granulats jusqu'au site isolé. Mais, il peut en être autrement ailleurs.

Bien que ce ne soit pas à proprement parler un revêtement, on peut également signaler l'utilisation de tôles d'acier, comme masque d'étanchéité, sur le parement du barrage de Cingino, en Italie (voir Annexe A).

8.2.2. Masques étrésillonnés

Les travaux de réparation, exécutés au barrage-poids de Ringedal, en Norvège et décrits en 1933 [41 et 42], sont parmi les plus anciens de ce type. Les premières tentatives de réparation au moyen de revêtements bitumineux et d'injections n'ayant pu réduire les fuites à un niveau acceptable, on décida de construire un masque entièrement nouveau contre le parement amont du barrage. Ce masque étanche, constitué de dalles en béton armé, reposait sur une série d'étrésillons en béton (voir Fig. 7).

8.2.3. Masques en béton ancrés

Sur plusieurs barrages, on a construit un nouveau masque en béton contre le parement amont. Le coût est généralement supérieur à celui de l'étanchement par enduit, mais la pérennité est meilleure puisque la tenue du masque ne repose pas sur une liaison parfaite et continue. En fait, une liaison suffisante est obtenue au moyen de fers d'ancrage.

Les premiers travaux d'étanchement réussis sur une partie du barrage de Suorva (Suède) consistaient en un enduit bitumineux, maintenu et protégé par un masque en béton de 0,25 m d'épaisseur [38]. Aux barrages de Maentwrog et de Trawfynydd (Pays de Galles) [33], on utilisa 5 couches d'enduit bitumineux armé de fibres de verre, maintenues contre les parements amont par des masques en béton, de 0,6 à 1 m d'épaisseur. Ces masques étaient armés et fixés aux barrages au moyen de fers d'ancrage (voir Fig. 8 et 9). Ces réparations ont réduit les fuites pendant quelque temps; mais, 30 ans plus tard, la détérioration sur le barrage de Maentwrog était parvenue à un tel stade que la décision a été prise de remplacer le barrage par un nouvel ouvrage situé immédiatement à l'aval. Au barrage d'Agger (RFA) [23], le masque en béton armé, de 0,28 m d'épaisseur, ancré au barrage, était posé sur une couche étanche de béton bitumineux de 12 cm d'épaisseur.

Gunite or shotcreting, incorporating a mesh, has been widely used for dam repairs but in almost all reported cases it has not proved durable. Generally adhesion to the main dam concrete has been lost over large areas with eventual break up. This occurred, for example, at Drum Afterbay dam [9] and Delta dam [37], both in the USA, Maentwrog dam in Wales [33] and Suorva dam in Sweden [38]. Gunite de-bonding is especially likely where temperature ranges are high. An exception seems to be Italian experience in the Alps, where gunite is reported to have remained effective for 20 to 25 years.

Elastomeric Silicone [39], Neoprene Latex [38], Epoxy Resins and other synthetic facings have been widely used and are the subject of an ICOLD Bulletin [40]. Reference should be made to that Bulletin for more guidance. In general they are expensive and results have varied. For example, at Suorva dam in Sweden [38], Neoprene did not work as well by itself as Epoxy resin, due mainly to temperature effects. Interestingly at the same dam Epoxy resin repairs were cheaper than constructing a new facing wall in concrete. This was due to the remoteness of the site and cost of hauling large quantities of aggregate; it is not always the case.

Although not strictly a coating, reference might also be made to the use of iron plate, erected as a waterproofing barrier, on the face of Cingino dam in Italy, see Appendix A.

8.2.2. Braced Facing Walls

One of the earliest major repairs to a concrete gravity dam was that carried out at Ringedal dam in Norway and reported in 1933 [41 and 42]. Bituminous coatings and grouting had each failed to reduce leakage to an acceptable level and it was therefore decided to construct an entirely new facing wall on the upstream face of the dam. The wall was composed of reinforced concrete slabs, sealed and braced off the upstream face by a series of concrete struts, see Fig. 7.

8.2.3. Anchored Concrete Facing Walls

A technique which has been used with success on several dams is the construction of an entirely new concrete wall directly on the upstream face of the dam. This is generally more expensive than remedial painting but is far more durable as the integrity of the face does not rely on continuous and perfect bonding. In fact an overall bond is effectively achieved by the use of anchor bars.

The first successful waterproofing on part of Suorva dam in Sweden is reported to have been by use of a facing layer of bitumen, itself retained and protected by a 0.25 m thick upstream concrete wall [38]. At Maentwrog and Trawfynydd dams in Wales [33] upstream waterproofing was achieved using 5 bituminous coats incorporating glass fibre, retained against the upstream faces by 0.6 to 1.0 m thick concrete facings. The facings were reinforced and tied back to the main dam concrete using anchor bars, see Fig. 8 and 9. The repairs reduced leakage for some while, although 30 years later deterioration at Maentwrog dam had progressed to the point where the dam was considered to need replacement by a new dam immediately downstream. A similar doubly reinforced concrete facing wall, 0.28 m thick, was anchored back to the main body of Agger dam in Germany [23]. It retained a 12 cm waterproofing layer of asphaltic concrete.

Aux barrages d'Arno, d'Avio et de Salarno (Italie) [43], les désordres superficiels, initialement provoqués par les cycles de gel-dégel, furent aggravés sensiblement par l'action de l'eau très pure des retenues, provenant de la fonte des glaciers. Chaque barrage fut muni d'un masque massif, de 4,0 m d'épaisseur à la base et de 1,5 m en crête, armé et ancré. Chaque masque comportait un réseau complet de galeries et de drains de décompression (voir Fig. 10 et 11). Les joints principaux espacés de 12 m furent soigneusement étanchés (voir paragraphe 8.2.4).

8.2.4. Joints et fissures

On a déjà souligné, au paragraphe 3.3.1, que les joints et les fissures sont des zones favorisant l'agression par les agents extérieurs. Aussi est-il essentiel d'assurer efficacement l'étanchéité des joints, ainsi que des fissures. La Fig. 12 illustre deux types de joints adoptés lors des réparations de barrages. Celui du barrage de Careser (Italie) correspond au joint d'un masque amont du type décrit en 8.2.3. Dans le cas du barrage de Guerlédan (France), il s'agit de la réfection d'un joint existant du barrage.

L'étanchement de fissures dans un barrage pose un problème quelque peu différent. La Fig. 13 montre les techniques utilisées sur trois barrages français [39], mais le choix dépend, pour beaucoup, des produits dont on dispose et des recommandations faites par les fabricants pour leur mise en œuvre. Avant l'exécution de travaux importants, il faut prévoir une campagne d'essais et des discussions avec les spécialistes.

8.2.5. Injections

L'injection de matériaux appropriés dans les fissures, joints et vides, est vraisemblablement la technique la plus répandue en matière de réparations d'étanchéité et autres réparations de barrages. Si la vidange est impossible, il faut procéder depuis l'aval ou depuis des galeries internes.

Il est possible de vérifier l'efficacité immédiate des injections effectuées pour colmater les fuites en observant l'écoulement des percolations. Des vérifications plus approfondies de la restauration de l'ouvrage peuvent être effectuées aux ultrasons [44] — voir paragraphe 7.8. En milieu agressif, des injections dont l'exécution donnait apparemment satisfaction ont parfois été suivies de détériorations. Des contrôles sur une longue période sont donc généralement nécessaires pour déterminer si le travail exécuté est efficace ou non.

Les résultats sont variables. Par exemple, aux barrages de Maentwrog (Pays de Galles) [33], Suorva (Suède) [38] et Agger (RFA) [23], les résultats furent jugés décevants. Parmi les causes de ces échecs, on peut citer :

- manque de rigueur dans l'étude ou l'exécution;
- nombre et profondeur insuffisants des forages d'injection;
- résistance mécanique insuffisante du coulis d'injection;
- choix inadéquat des matériaux.

En ce qui concerne le premier point de cette liste, il faut une bonne définition des travaux à exécuter, avant l'ouverture du chantier, compte tenu des commentaires faits au chapitre 7 « Enquêtes sur des barrages existants ».

La profondeur insuffisante des forages (généralement 1 m seulement à partir

At Arno, Avio and Salarno dams in Italy [43] face deterioration was caused mainly by freeze-thaw action but noticeably accelerated by the leaching action of the very pure, glacial, lake water. In each case massive facing walls were constructed. These tapered from approximately 4.0 m thick at the bases of the dams to 1.5 m thick at their crests. The facings were reinforced and anchored and contained comprehensive systems of galleries and relief drains, see Fig. 10 and 11. The facings had main joints at 12 m centres and careful attention was paid to sealing these, see Section 8.2.4.

8.2.4. Joints and Fissures

As was stressed in Section 3.3.1, joints and fissures are particular danger areas when aggressive attack is being considered. Formed joints have therefore to be effectively waterproofed as do fissures. Fig. 12 illustrates two typical joints used in dam repairs. The detail from Careser dam in Italy is associated with a remedial upstream facing wall of the type discussed in Section 8.2.3. The detail from Guerledan dam in France involves the breaking out and reforming of an existing joint.

The sealing of irregular fissures in main dam walls requires a slightly different approach. Fig. 13 illustrates details used at three French dams [39]. Such details would normally depend to a large extent on what proprietary materials and systems were readily available and on manufacturer's recommendations for their use. Discussions with specialists and testing would normally take place before extensive repairs were carried out.

8.2.5. Grouting

The injection of grout in some form, to fill fissures, cracks, joints and voids, is probably the most widely used technique for sealing and for other general repair work at dams. Grouting from downstream or from within internal galleries may be the only technique available in cases where the reservoir cannot be drawn down.

The immediate effectiveness of grouting to seal leaks can be checked by observing seepage flows. More thorough checks on the restoration of structural integrity may be made using ultrasonic techniques [44], see Section 7.8. Under aggressive conditions, apparently successful grouting operations have sometimes been followed by subsequent deterioration and longer term reviews are generally required to determine the efficacy, or otherwise, of the work.

Results from grouting have varied. For example it was not considered to have been successful at Maentwrog dam in Wales [33], at Suorva dam in Sweden [38] or Agger dam in Germany [23]. There are various reasons why this might have been so, including :

- An unsystematic approach
- Insufficient numbers and depths of boreholes
- Overweak grout
- Inappropriate materials.

With regard to the first point it is important to have properly surveyed and planned the grouting before work starts. This would be an extension of what was described in Chapter 7 under Investigations at Existing Dams.

Insufficient depth of borehole (in general only 1 m from the downstream face)

du parement aval) fut certainement la cause de l'échec des injections au barrage de Maentwrog (Pays de Galles).

On est souvent tenté d'utiliser un coulis à forte pénétration. C'est une erreur, notamment en milieu agressif, car la pérennité est compromise. On a préconisé un E/C maximal de 3/1 comme limite raisonnable [45]. Mais même cette valeur serait sujette à caution en conditions défavorables.

Si le but des injections est de réparer les effets de l'agression par l'eau, le ciment Portland ordinaire (CPA) n'est pas le bon choix. Comme il est dit au paragraphe 6.2.2., les ciments Portland de laitier et aux pouzzolanes présentent des avantages en cas de lessivage, tandis qu'il faut un ciment résistant aux sulfates en présence d'eau sulfatée. On a utilisé des silicates et des résines pour compléter les injections de coulis de ciment au barrage de Garichte (Suisse) [26] (voir Fig. 14). L'utilisation de polyuréthanes pour l'étanchement de certains barrages aux États-Unis est mentionnée par Kriekemans [46]. Pour les joints principaux de dilatation, il faut avoir recours aux résines commercialisées par des spécialistes, seules capables de présenter la souplesse nécessaire pour s'adapter aux mouvements. Dans ce cas, on injecte lorsque la température du barrage est minimale et les joints ouverts.

8.2.6. Réparations sous l'eau des parements

S'il est possible d'exécuter certaines petites réparations sous l'eau, le prix est élevé et les domaines d'application limités. Dans tous les cas, il faut faire appel à des spécialistes (fabricants, fournisseurs, entrepreneurs).

8.3. STABILITÉ

Dans bien des cas, le lessivage progressif a pour résultat, non seulement une augmentation des débits de percolation, mais aussi une augmentation des sous-pressions compromettant la sécurité de l'ouvrage. Ce problème est parfois aggravé par la présence de dépôts de matériaux lessivés dans le réseau de drainage; les débits sont réduits, mais la valeur des sous-pressions augmente par contre (voir paragraphe 5.3). Dans plusieurs cas, ce problème a été encore aggravé par l'insuffisance du réseau de décharge des sous-pressions dans le projet initial. Pour améliorer la stabilité de l'ouvrage, on peut appliquer une précontrainte sur toute la hauteur du barrage (jusque dans la fondation), ou prévoir une butée côté aval. Dans les deux cas, ces travaux sont généralement complétés par le rétablissement de l'étanchéité (paragraphe 8.2) et le renforcement des dispositifs de drainage et de décompression.

Le barrage de Delta (États-Unis) fut consolidé par des tirants de précontrainte (Fig. 15), complétés par des injections importantes. Ces travaux avaient été précédés par la construction d'un nouveau parement amont et d'un massif de butée aval.

La précontrainte initialement prévue pour la consolidation du barrage d'Avon (Australie) fut rejetée au profit d'un remblai en terre de butée aval. Quatre solutions furent examinées; elles sont énumérées ci-dessous, avec leur coût respectif par rapport à la solution de référence : remblai = 1 :

- Remblai en terre construit contre le parement aval 1,0
- Tirants de précontrainte 1,2

was almost certainly one reason for lack of success in grouting Maentwrog dam in Wales.

It is tempting, when grouting, to use thin grout to help penetration. This is generally a mistake and especially so in aggressive conditions, as such grouts are not durable. A maximum water/cement ratio of 3 to 1 has been quoted [45] as a reasonable limit. Even this would be suspect where conditions are unfavourable.

If the grouting is to remedy the effects of aggressive water attack, grouting with ordinary Portland cement alone is unlikely to be appropriate. As discussed in Section 6.2.2., Portland blast furnace and pozzolanic cements may be used to advantage where leaching is a problem while in aggressive sulphate conditions, sulphate resisting cement should be used. Silicates and resins were used to supplement cement grouting at Garichte dam in Switzerland [26] see Fig. 14, while the use of polyurethane grouts to seal dams in the USA is outlined by Kriekemans [46]. Where it is necessary to seal main expansion joints by grouting, proprietary resin systems will be necessary in order to achieve sufficient flexibility to accommodate movement. It would nevertheless seem appropriate to grout such joints with the structures at as low a temperature as possible to maximise the dilation of the joints.

8.2.6. Underwater Face Repairs

Some patching of deteriorated concrete may be possible underwater, although, it is likely to be expensive and of limited use. In any event specialist manufacturers, suppliers and contractors would need to be consulted.

8.3. STABILITY

On several dams the gradual leaching of material has led not only to increased seepage flows but to increased uplift pressures which lower the safety of the structures to below acceptable levels. This can be aggravated by the deposition of leached material in the drainage relief works, reducing outflows but nevertheless still increasing uplift, see Section 5.3. In several cases the above processes were aggravated still further by the lack of proper uplift relief provisions in the original designs. Stability can be enhanced by either stressing the dam down to its foundations or by the construction of some form of buttressing downstream. In either case such work is likely to be accompanied by some form of waterproofing, as described in Section 8.2, and by improving the drainage relief capabilities.

Stressing by means of post-tensioned anchors was used at Delta dam in the USA, see Fig. 15. It was accompanied by extensive grouting and was in addition to the construction of a new upstream face and downstream thrust block which had been carried out earlier.

Stressing was also considered as a means of improving the stability of Avon dam in Australia, but was rejected in favour of buttressing with an earth embankment. In fact four alternatives were considered. These are listed as follows, together with their costs as a function of the earth embankment solution :

- An earth embankment against the downstream face 1.0
- Post tensioning 1.2

- Contreforts en béton, reliés au parement aval 3,3
- Dalle en béton, reliée au parement aval 3,6

La raison de l'abandon des tirants ne fut pas leur coût, mais la concentration des forces qu'ils provoquaient, risquant de dépasser le niveau acceptable de contraintes dans le béton détérioré. En outre, on jugea ce projet moins fiable à long terme que le remblai [21, 22]. Les cellules de pression noyées dans le remblai indiquaient un report des efforts (effet d'arc longitudinal et transversal), mais, dans l'ensemble, ces mesures confirmaient que le coefficient de pression des terres à prendre en compte dans les calculs était le coefficient de pression au repos (K_0). Une solution identique fut adoptée pour la consolidation du barrage de Trawsfynydd [33] (voir Fig. 9).

Comme indiqué ci-dessus, la consolidation est presque toujours complétée par le rétablissement de l'étanchéité et l'amélioration du réseau de drainage et de décompression (alésage des drains existants, mise en place d'un nouveau réseau).

8.4. ATTAQUE PAR LES ACIDES EN GALERIES

On cite plusieurs cas d'attaque par les acides à l'intérieur de galeries de barrage, due à l'accumulation de gaz, tel que l'acide sulfhydrique ou à l'apport d'acides par les produits de sulfures oxydés (paragraphe 2.5). Parfois, le phénomène est accéléré par l'action de bactéries. Les solutions préconisées au barrage de Clendening (États-Unis) comprennent des chasses périodiques et/ou la mise en place d'un réseau de ventilation, si possible. Au barrage d'El Atazar (Espagne), la paroi très détériorée d'un puits d'ascenseur fut brossée pour enlever tout le béton détérioré et, après séchage au chalumeau à butane, enduite de résines polyuréthannes, immédiatement chauffées pour accélérer la polymérisation.

8.5. COLMATAGE DES POMPES DE DRAINAGE

Si le calcium, entraîné par lessivage, se dépose dans les puisards sous forme de carbonate de calcium, le bon fonctionnement des pompes peut être gravement compromis (paragraphe 5.2 et 6.6). Parmi les solutions à adopter, on peut citer :

- mise en place d'un adoucisseur classique de l'eau, dont l'échangeur d'ions est périodiquement régénéré au chlorure de sodium;
- nettoyage périodique des pièces mécaniques par traitement à l'acide dilué, par exemple l'acide nitro-acétique;
- aération de l'eau dans le puisard, afin que l'anhydride carbonique puisse se dissoudre et transformer les carbonates en bicarbonates solubles.

En cas d'adoption de la première ou de la troisième solution, il sera peut-être nécessaire de procéder au nettoyage préalable des pièces mécaniques de la pompe.

8.6. APPAREILS DE MESURE ET AUSCULTATION

Les travaux de réparation sont complétés par la mise en place d'un dispositif de surveillance (visites, appareils de mesure) visant à contrôler l'efficacité des travaux exécutés et à déceler les problèmes éventuels nécessitant des travaux supplémentaires. La nature du dispositif à prévoir est fonction des travaux exécutés mais quelques conseils d'ordre général sont donnés au paragraphe 6.9.

- Concrete buttresses bonded to the downstream face 3.3
- A concrete slab bonded to the downstream face 3.6

In fact stressing was not rejected on the basis of cost but rather on the basis that the large local forces involved might overstress the already deteriorated concrete and because stressing was not seen as so permanent a solution as the construction of a massive earth embankment [21, 22]. Pressure cells located in the embankment indicated both longitudinal and transverse arching but that generally the appropriate coefficient of earth pressure for analyses would be the K_0 , at rest, pressure. A similar solution for the enhancement of stability was adopted at Trawsfynydd dam, see Fig. 9 [33].

As mentioned above, such works to enhance stability would almost always be accompanied by some form of waterproofing, as described in Section 8.2, and by the improvement of the drainage relief provisions. The latter may be accomplished by reaming out an existing system or the construction of a complete new relief system.

8.4. ACID ATTACK IN GALLERIES

There have been several cases of acid attack within dam galleries, due either to the build-up of gases such as hydrogen sulphide or to the introduction of acid directly via the products of oxidised sulphides, see Section 2.5. In some cases the process has been accelerated by bacterial action. Remedies suggested at Clendening dam in the USA include periodic flushing and/or the installation of adequate ventilation where this is possible. At the El Atazar dam in Spain, the badly affected face of a lift shaft was wire brushed and cleaned back to sound concrete, the surface dried using a butane gas lamp and then coated with polyurethane resins. These were immediately heated in order to actuate polymerisation.

8.5. SCALING UP OF DRAINAGE PUMPS

Where leached calcium is deposited in the form of calcium carbonate in drainage sumps, the smooth operation of drainage pumps may be seriously impaired, see Sections 5.2 and 6.6. Solutions include :

- Installing a conventional water softening plant using an ion exchange resin which will periodically require re-generation with sodium chloride.
- Periodic cleaning of affected mechanical parts by spraying with a weak acid such as nitrioloacetic acid.
- Bubbling air through the sump water so that carbon dioxide can dissolve and convert any carbonates into soluble bicarbonates.

Both the first and last solutions may require the mechanical parts to be cleaned first in any case.

8.6. INSTRUMENTATION AND MONITORING

It is recommended that monitoring and, if appropriate, instrumentation should accompany any remedial work, both to check on the effectiveness of the work and to give adequate warning of the need for further work. The nature of the instrumentation or monitoring will depend on the work undertaken, however, Section 6.9 gives some general basic advice.

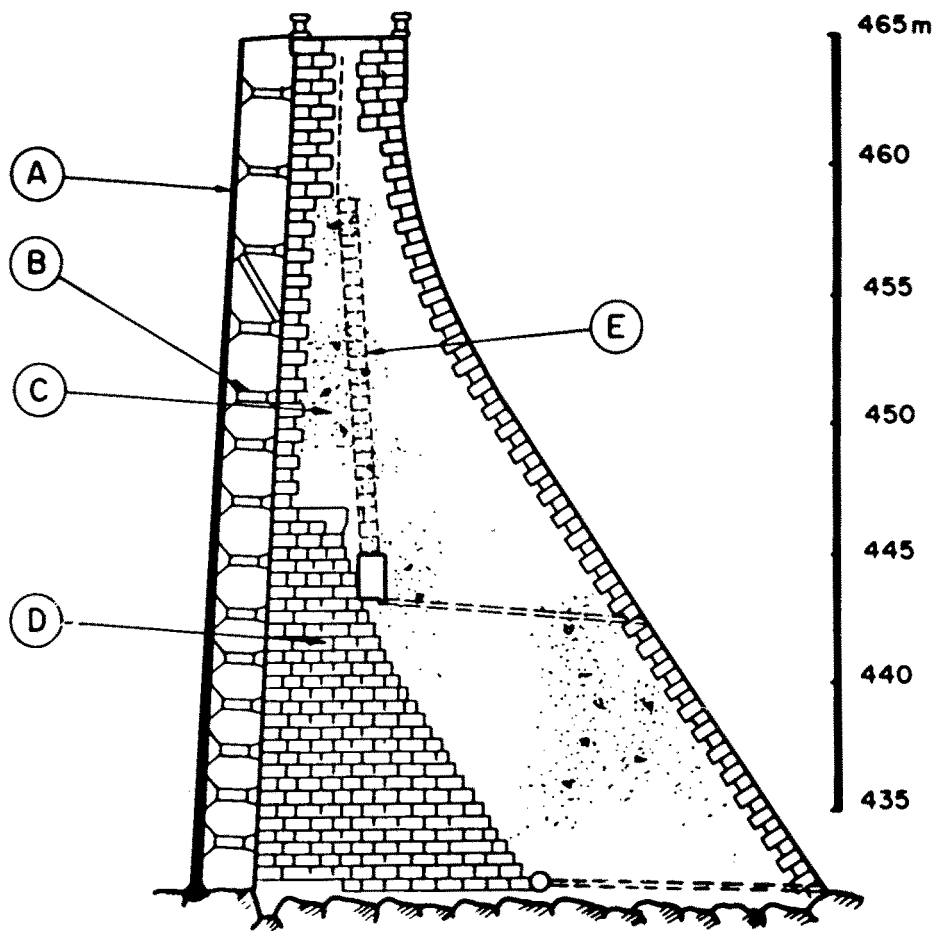


Fig. 7

Propped upstream facing wall at Ringedal dam, Norway.

Masque étré sillonné du barrage de Ringedal (Norvège).

- (A) Concrete facing wall.
- (B) Concrete struts.
- (C) Cyclopean concrete.
- (D) Masonry.
- (E) Drainage.

- (A) *Masque amont en béton.*
- (B) *Étré sillons en béton.*
- (C) *Béton cyclopéen.*
- (D) *Maçonnerie.*
- (E) *Drains.*

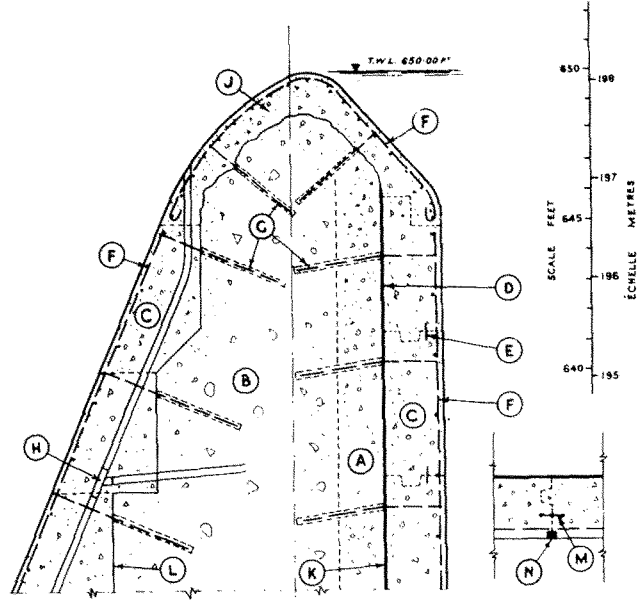
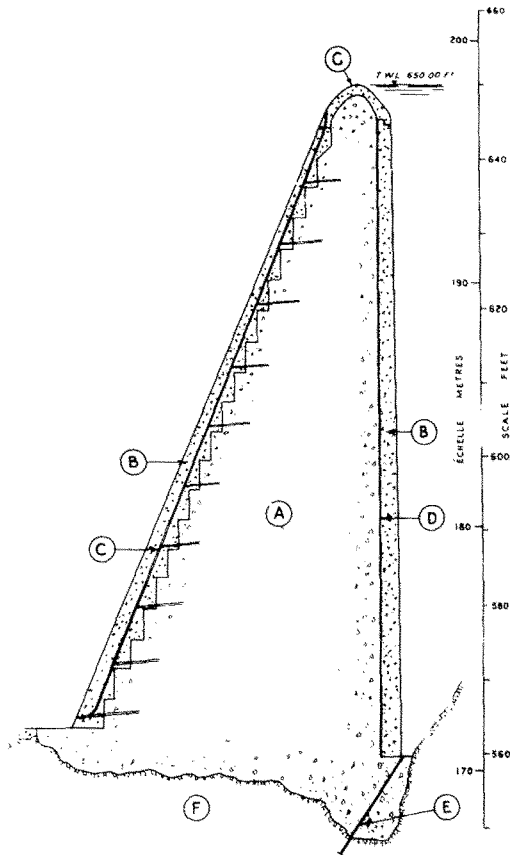


Fig. 8

Remedial facing and grouting at Maentwrog arch dam, Wales.
Réparation des parements et injection au barrage-voûte de Maentwrog (Pays de Galles).

Maentwrog arch dam.

Barrage-voûte de Maentwrog.

- | | |
|---|---|
| (A) Original mass concrete with plums. | (A) <i>Béton de masse initial avec grosses pierres.</i> |
| (B) New colcrete face. | (B) <i>Nouveau parement en colcrete.</i> |
| (C) Drainage system. | (C) <i>Réseau de drainage.</i> |
| (D) 5 coat bitumen/fibreglass membrane. | (D) <i>Enduit bitumineux avec fibres de verre.</i> |
| (E) Grout holes. | (E) <i>Trous d'injection.</i> |
| (F) Rock foundation. | (F) <i>Fondation rocheuse.</i> |
| (G) New concrete crest. | (G) <i>Nouvelle crête en béton.</i> |

Maentwrog arch dam - Detail of repair.

Barrage-voûte de Maentwrog - Détail des réparations.

- | | |
|---|--|
| (A) Facing concrete 6 : 1. | (A) <i>Béton de parement 6 : 1.</i> |
| (B) Concrete 4 : 1 with plums. | (B) <i>Béton 4 : 1 avec grosses pierres.</i> |
| (C) New colcrete facing. | (C) <i>Nouveau parement en colcrete.</i> |
| (D) 5 coat bitumen/fibreglass membrane. | (D) <i>Enduit à 5 couches de bitume/fibres de verre.</i> |
| (E) Metallic waterstop. | (E) <i>Lame d'étanchéité métallique.</i> |
| (F) Reinforcement. | (F) <i>Armature.</i> |
| (G) Tie bars. | (G) <i>Barres de liaison.</i> |
| (H) Drainage system. | (H) <i>Réseau de drainage.</i> |
| (J) New concrete crest. | (J) <i>Nouvelle crête en béton.</i> |
| (K) Original upstream face. | (K) <i>Parement amont initial.</i> |
| (L) Original downstream face. | (L) <i>Parement aval initial.</i> |
| (M) Vertical rubber waterstop at construction joints (60 ft centres). | (M) <i>Lame d'étanchéité en caoutchouc aux joints de construction (intervalles de 18 m).</i> |
| (N) Sealing compound. | (N) <i>Baguette d'étanchéité plastique.</i> |

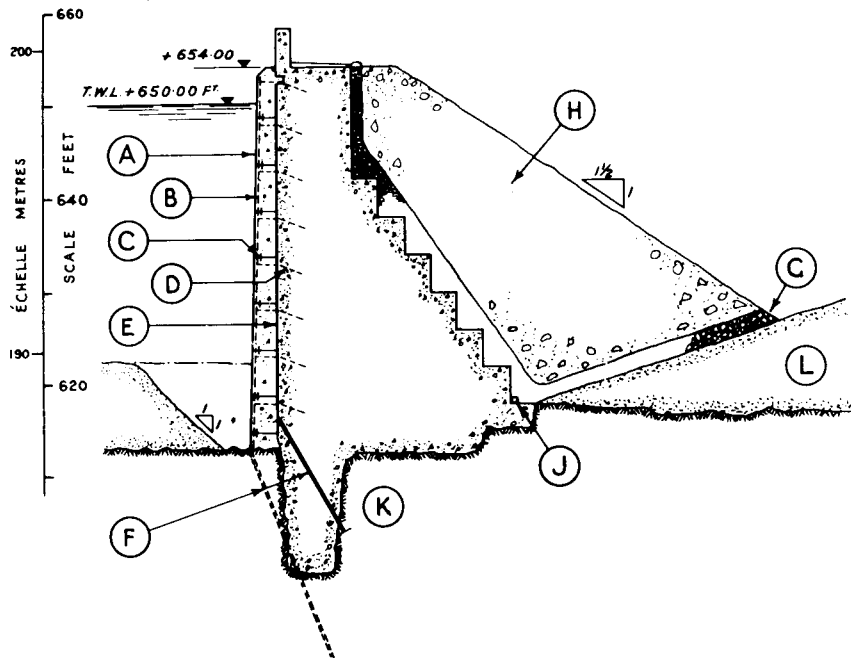


Fig. 9

Remedial facing and downstream embankment buttressing at Trawsfynydd dam, Wales.

*Réparation du barrage de Trawsfynydd (Pays de Galles),
au moyen d'un nouveau parement amont et d'un remblai de butée aval.*

- | | |
|---|---|
| (A) Colcrete face. | (A) Béton colcrete (parement). |
| (B) Reinforcement. | (B) Armature. |
| (C) Waterstop. | (C) Lame d'étanchéité. |
| (D) Tie bars. | (D) Barres de liaison. |
| (E) 5 coat bitumen/fibreglass membrane. | (E) Enduit à 5 couches de bitume/fibres de verre. |
| (F) Grout holes. | (F) Trous d'injection. |
| (G) Broken stone mattress. | (G) Matelas de pierres concassées. |
| (H) Embankment. | (H) Terre tout-venant compactée. |
| (J) Porous concrete drain. | (J) Drain en béton poreux. |
| (K) Rock foundation. | (K) Fondation rocheuse. |
| (L) Moraine overburden. | (L) Terrain morainique de couverture. |

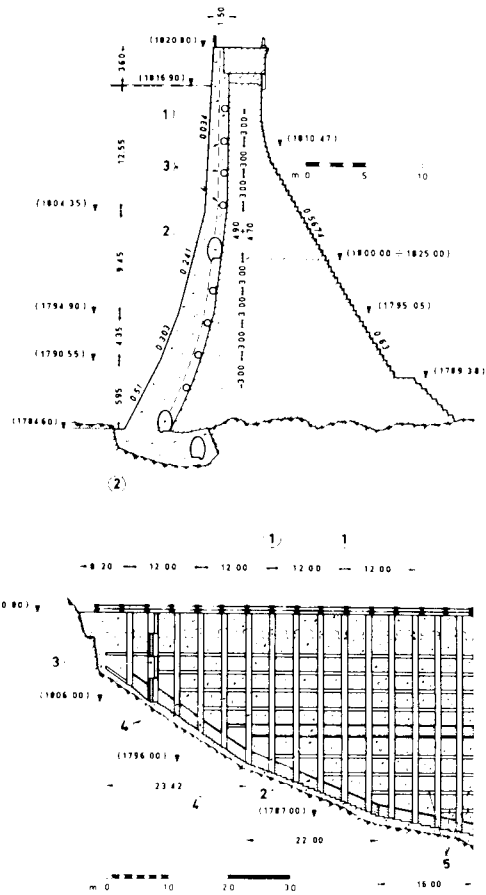


Fig. 10

Remedial facing at Arno dam, Italy.
*Réparation du barrage d'Arno (Italie), au moyen
 d'un nouveau parement amont.*

Cross section. — *Coupe transversale.*

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| (1) New facing. | (1) <i>Nouveau parement.</i> |
| (2) Inspection galleries. | (2) <i>Galeries de visite.</i> |
| (3) Drain pipes. | (3) <i>Drains.</i> |

Longitudinal section of the new facing.
Coupe longitudinale du nouveau parement.

- | | |
|-------------------------------------|--|
| (1) Expansion joints. | (1) <i>Joints de dilatation.</i> |
| (2) Inspection galleries. | (2) <i>Galeries de visite.</i> |
| (3) Access shaft. | (3) <i>Puits d'accès.</i> |
| (4) Inspection and drainage shafts. | (4) <i>Puits de visite et de drainage.</i> |
| (5) Drain pipes. | (5) <i>Drains.</i> |

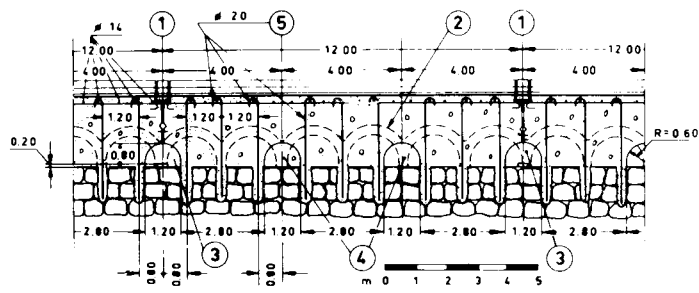
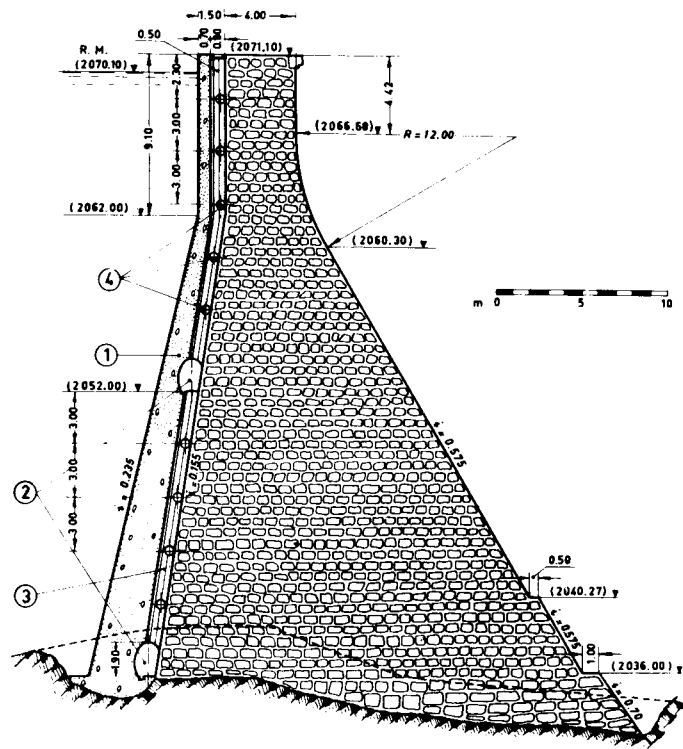


Fig. 11

Remedial facing at Salarno dam, Italy.
*Réparation du barrage de Salarno (Italie)
au moyen d'un nouveau parement amont.*

Cross section. — *Coupe transversale.*

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| (1) New facing. | (1) <i>Nouveau parement.</i> |
| (2) Inspection galleries. | (2) <i>Galeries de visite.</i> |
| (3) Drainage shaft. | (3) <i>Puits de drainage.</i> |
| (4) Drain pipes. | (4) <i>Drains.</i> |

Detail of the new facing. — Horizontal section.
Détail du nouveau parement. — Coupe horizontale.

- | | |
|--------------------------------------|--|
| (1) Contraction joints. | (1) <i>Joints de contraction.</i> |
| (2) Profile of the Lévy-type facing. | (2) <i>Trace du masque Lévy.</i> |
| (3) Shafts for inspection of joints. | (3) <i>Puits de visite des joints.</i> |
| (4) Drainage shafts. | (4) <i>Puits de drainage.</i> |
| (5) Anchorage steel bars. | (5) <i>Fers d'ancrage.</i> |

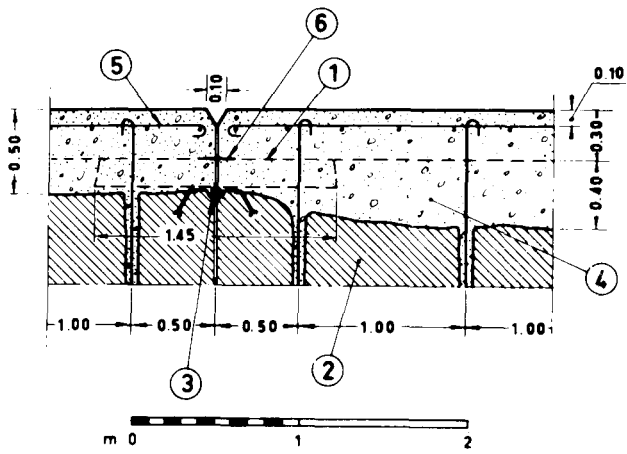
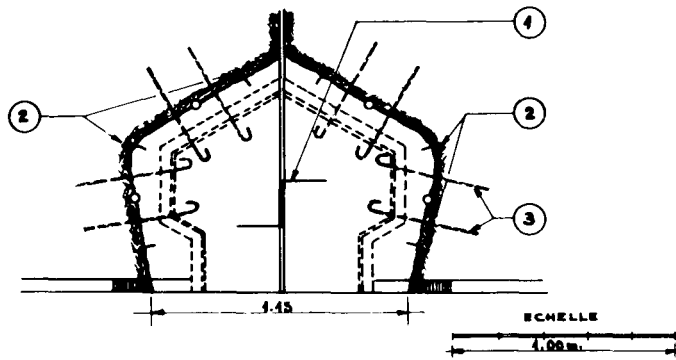


Fig. 12

Installation of new upstream seals in contraction joints
at Guerlédan dam (France) and Careser dam (Italy).
*Rénovation des étanchéités amont des joints de retrait des barrages
de Guerlédan (France) et de Careser (Italie).*

Guerlédan dam. — Repaired joint.
Barrage de Guerlédan. — Joint réparé.

- | | |
|------------------------------|--|
| (1) Main copper waterstop. | (1) <i>Lame d'étanchéité principale en cuivre.</i> |
| (2) Auxiliary copper strips. | (2) <i>Lames de cuivre auxiliaires.</i> |
| (3) Anchorage bars. | (3) <i>Fers d'ancrage.</i> |

Careser dam.
Detail of the new protection facing. — Horizontal section.
Barrage de Careser.

Détail du nouveau masque de protection. — Coupe horizontale.

- | | |
|--|---|
| (1) Original surface of upstream face. | (1) <i>Surface d'origine du parement amont.</i> |
| (2) Existing masonry body. | (2) <i>Massif existant.</i> |
| (3) Existing copper sheet. | (3) <i>Lame en cuivre existante.</i> |
| (4) New concrete. | (4) <i>Nouveau béton.</i> |
| (5) 0.33 m side square mesh reinforcement
Ø 12. | (5) <i>Armature Ø 12 à mailles carrées de 0,33 m
de côté.</i> |
| (6) Seal elastic section. | (6) <i>Lame élastique d'étanchéité.</i> |

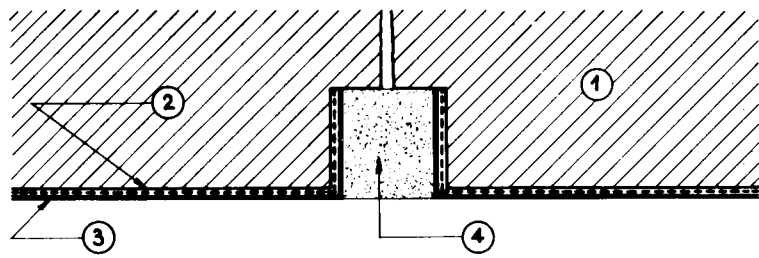
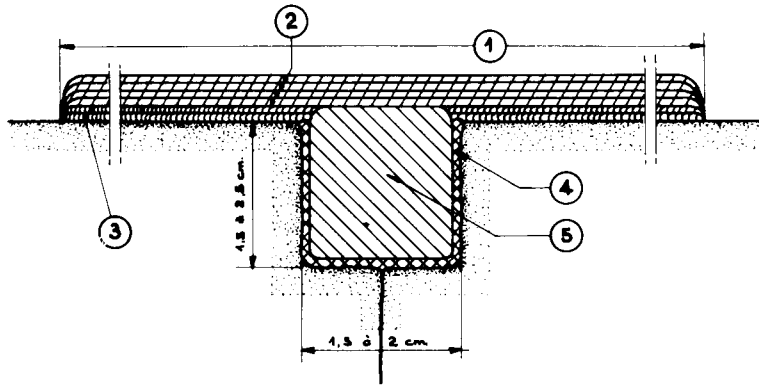
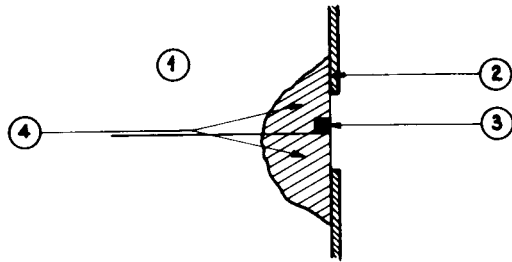


Fig. 13

Fissure sealing details at La Bromme,
La Girotte and Le Gage dams (France).
*Détails de l'étanchement des fissures aux barrages
de La Bromme, de La Girotte et du Gage (France).*

La Bromme dam.

Barrage de La Bromme.

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| (1) Concrete. | (1) Béton. |
| (2) Paxalumin. | (2) Paxalumin. |
| (3) Thiokol. | (3) Thiokol. |
| (4) Mortar with Oxydo-cement. | (4) Mortier à l'oxydo-ciment. |

La Girotte dam.

Barrage de La Girotte.

- | | |
|---|---|
| (1) General facing. | (1) Revêtement général. |
| (2) Hypalon 4 c. | (2) Hypalon 4 c. |
| (3) 2 c. Simmast SA 30 (Epoxy + Styrolbutadiene). | (3) 2 c. Simmast SA 30 (epoxy + styrolbutadiene). |
| (4) Primary No. 1. | (4) Primaire n° 1. |
| (5) Thiokol. | (5) Thiokol. |

Gage Dam.

Barrage du Gage.

- | | |
|--|---|
| (1) Concrete. | (1) Béton. |
| (2) 1st. binding coat, based on Neoprene. | (2) 1 ^{re} couche d'accrochage à base de néoprène. |
| (3) 3 coats of hypalon paint, without any catalytic agent. | (3) 3 couches de peinture hypalon sans catalyseur. |
| (4) Self-vulcanizing silicone elastomers. | (4) Remplissage élastomères de silicones auto-vulcanisants. |

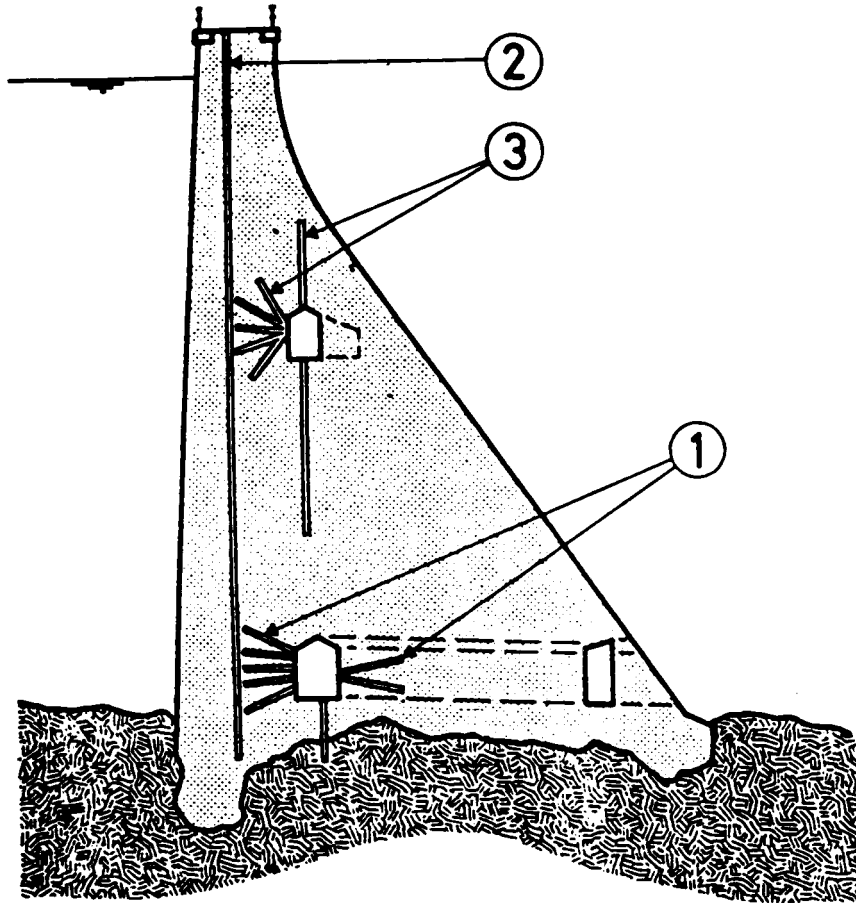


Fig. 14

Internal grouting at Garichte gravity dam (Switzerland).

Injections internes au barrage-poids de Garichte (Suisse).

- | | |
|---|---|
| (1) Boreholes for grouting executed a few years after completion. | (1) <i>Forages d'injection exécutés quelques années après l'achèvement.</i> |
| (2) Drillholes of treatment 1966. | (2) <i>Forages par rotation de la campagne d'injection 1966.</i> |
| (3) Boreholes of treatment 1966. | (3) <i>Forages à percussion de la campagne 1966.</i> |

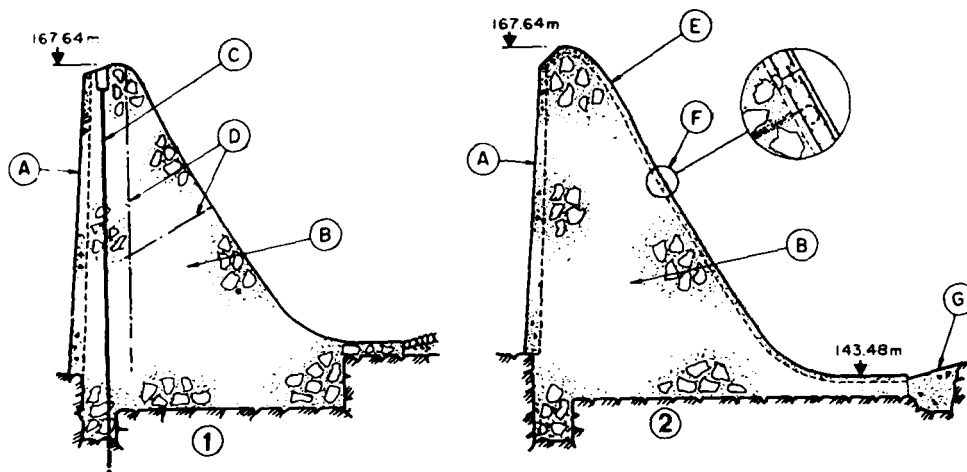


Fig. 15

Remedial facing, grouting, stressing and thrust block at Delta dam (USA).

Réparation du barrage Delta (États-Unis) au moyen d'un nouveau parement, d'injections, de tirants de précontrainte et d'un massif de butée aval en béton.

- (1) Eastern half of spillway.
- (2) Western half of spillway.
- (A) Concrete facing wall.
- (B) Cyclopean concrete.
- (C) Stressed anchor with double corrosion protection, in a 200 mm dia. hole and de-bonded over the height of the dam.
- (D) Grouting check holes.
- (E) Re-profiled Ogee crest.
- (F) 450 mm concrete facing slab with double reinforcement, anchors and drains and waterstops at joints.
- (G) Thrust block (1925).

- (1) Profil de l'évacuateur de crue - côté est.
- (2) Profil de l'évacuateur de crue - côté ouest.
- (A) Masque en béton.
- (B) Béton cyclopéen.
- (C) Tirant de précontrainte avec double protection contre la corrosion, dans un trou de forage de 200 mm de diamètre, avec tête d'ancrage à la partie supérieure du barrage.
- (D) Trous de contrôle des injections.
- (E) Crête déversante reprofilée.
- (F) Revêtement en béton du parement aval, de 450 mm d'épaisseur, avec double armature, ancrages, drains et waterstops aux joints.
- (G) Massif de butée aval (1925).

9. REFERENCES

1. DAVIS D. E. : " The Nature of Concrete ", Conference on Concrete in Aggressive Environments, Conc. Soc. of S. Africa, Pretoria, Oct. 1977.
2. BARRY D. L. : " Material Durability in Aggressive Ground ", CIRIA Report 98, London, 1983.
3. POWER T. and HAMMERSLEY G. : " Chloride and Reinforcement Corrosion in Concrete ", *Forum*, April 1980.
4. EGLINGTON M. S. : " Review of Concrete Behaviour in Acidic Soils and Ground Water ", CIRIA Report 69, London, 1975.
5. LEA F. M. : " The Chemistry of Cement and Concrete ", 3rd Ed., Edward Arnold Ltd., Glasgow, 1970.
6. " Acid Rain ", *The Watt Committee on Energy*, Report No. 14, London, 1984.
7. CAMPBELL D. F. *et al.* : " The Ageing of Concrete Dams in Scotland ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 10, Istanbul, 1967.
8. FULTON F. S. (Ed), " Concrete Technology ", 5th Ed., The Portland Cement Institute, Johannesburg, 1977, Chapter 10, Concrete in Aggressive Environments, J. H. P. Van Aardt and F. S. Fulton.
9. PIRTZ D. *et al.* : " Investigation of Deteriorated Concrete Arch Dam ", *World Dams Today*, 1970.
10. SHIRLEY D. E. : " Sulphate Resistance of Portland Cement Concrete ", *Cement and Concrete Association*, 1984.
11. LEA F. M. : " Deterioration of Concrete Owing to Chemical Attack ", *Jrnl. of Inst. Sanitary Engrs.*, June, 1936.
12. BUDWEG M. G. : " Rehabilitation of the Rasgao Dam ", 15th ICOLD Congress, Vol. IV, Q 59-R 11, Lausanne, 1985.
13. BEEBY A. W. : " Concrete in the Oceans-Cracking and Corrosion ", *Technical Report*, No. 1, CIRIA/UEG, C & CA, Dept. of Energy, 1978.
14. FRISTROM G. and SALLSTROM S. : " Control and Maintenance of Concrete Structures in Existing Dams in Sweden ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 22, Istanbul, 1967.
15. BROWNE R. D. and DOMONE P. L. J. : " The Long-term Performance of Concrete in the Marine Environment ", Proceedings of Conference on Offshore Structures, *Inst. of Civil Engineers*, October 1974.
16. MULLER J. R. : " Deterioration of Portland Cement in Natural Waters ", Conference on Concrete in Aggressive Environments, *Conc. Soc. of S. Africa*, Pretoria, Oct. 1977.
17. MORTON T. H. : " An Algorithm for the Langelier Index of Process Waters ", *Jrnl. of the Inst. of Water Engrs. and Scientists*, Vol. 31, No. 1, Jan. 1977.
18. " Concrete in Sulphate-bearing Soils and Groundwaters ", *Building Research Establishment Digest* 250, June 1981.
19. BARIOLI E. and CRAVIARI F., " Influences Physiques et Chimiques des Eaux de

- Filtration des Réservoirs sur les Bétons du Corps des Barrages ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 47, Istanbul, 1967.
20. HEGGSTAD R. and MYRAN R. : " Investigations on 132 Norwegian Concrete Dams ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 28, Istanbul, 1967.
 21. NICOL T. B. *et al.* : " Deterioration problems at Avon Dam ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 42, Istanbul, 1967.
 22. CARTER F. J. : " The Strengthening of Avon Dam ", *The Jrnl. of the Inst. of Engrs.*, Australia, June 1970.
 23. FEINER A. and ZICHER : " Sealing of the Aggerdam ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 11, Istanbul, 1967.
 24. SIMEK M. : " Regime of Seepage Water at Dams, some Experiences from Seepage Measurements ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 16, Istanbul, 1967.
 25. " Design Criteria for Arch and Gravity Dams ", *Eng. Monograph*, No. 19, United States Bureau of Reclamation, 2nd Rev., Washington, 1974.
 26. Swiss National Committee, " Maintenance and Rehabilitation connected with Swiss Dams over Fifty Years Old ", 15th ICOLD Congress, Vol. IV, Q 59-R 49, Lausanne, 1985.
 27. STEWART D. A. : " Limestone Aggregates in Water-retaining Structures ", *Concrete*, Vol. 5, No. 4, April 1971, p. 104.
 28. STEWART D. A. : " Limestone and Water Retention ", *Concrete*, Vol. 6, No. 7, July 1972, p. 24.
 29. VUORINEN J. : " Cements for Concrete for Large Dams ", ICOLD Bulletin 36 a, Oct. 1981.
 30. " Concrete Manual ", 8th Ed. US Dept. of the Interior, Washington, 1975.
 31. " Entrained Air Voids in Concrete Help Prevent Salt Damage ", *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 52, No. 5, May 1982, p. 17.
 32. MASON P. J. : " The Limit State Design of Dam Concrete ", *Int. Water Pwr. and Dam Constr.*, Vol. 33, No. 8, Aug. 1981.
 33. CROSTHWAITE C. D. and HUNTER J. K. : " The Deterioration of Concrete Dams, Forty Years Experience in North Wales ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 13, Istanbul, 1967.
 34. LINK : " Altersschaden an Staumauerhaus Bruchstein-mauerwerk oder Beton ", 1st ICOLD Congress, Q 1 a, Stockholm, 1933.
 35. " Tamagawa Dam ", Tamagawa Dam Construction Office, Tohoku Region Construction Bureau, Ministry of Construction, Japan, 1984.
 36. MCHENRY D. and OLESON C. C. : " Pulse Velocity Measurements on Concrete Dams ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 5, Istanbul, 1967.
 37. STANDIG K. F. : " Rehabilitation of the Delta Dam ", *Int. Water Pwr. and Dam Constr.*, Vol. 36, No. 12, December 1984.
 38. SALLSTROM S. : " Plastic Coatings used for Sealing Old Concrete Dam ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 21, Istanbul, 1967.
 39. CABANIOLS P. : " Entretien et Réparation des Barrages ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 19, Istanbul, 1967.
-

40. " Synthetic Resins for Facings of Dams ", ICOLD Bulletin 43, 1982.
41. GRONER F. : " Method for Repair and Preservation of Dams as used at Ringedal Dam, A/S Tyssefaldene, Hardanger, Norway ", 1st ICOLD Congress, Q 1 a-R 40, Stockholm, 1933.
42. HELLSTROM B. : " Decay and Repair of Concrete and Masonry Dams ", The Structural Engineer, *Jnrl. of the Inst. of Struct. Engrs.*, May 1933.
43. CONTESSINI F. : " La détérioration des parements de certains barrages des Alpes, Observations et mesures prises pour leur réfection ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 48, Istanbul 1967.
44. CARABELLI E. *et al.* : " Geophysical Methods for Determining the Integrity of Concrete of a Dam ", 13th ICOLD Congress, Q 49-R 40, New Delhi, 1979.
45. HOULSBY A. C. : " Foundation grouting for Dams-Part III ", ANCOLD Bulletin No. 50, April 1978.
46. KRIEKEMANS B. : " The Use of Polyurethane Grouts and Grout Tubes ", *Int. Water Pwr. and Dam Const.*, Vol. 36, No. 12, December 1984.
47. " Deterioration of Dams and Reservoirs ", ICOLD Report, December 1983.
48. ABU-EL DAHAB A. H. M. : " Measures Taken to Strengthen the Old Asswan Dam ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 33, Istanbul, 1967.
49. KOKUBU M. *et al.* : " Example of Deterioration from Frost Damage of Surfaces to Concrete Dams ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 3, Istanbul, 1967.
50. GRONER F. : " The Application of Plastic Membranes for the Protection and Repair of Deteriorations of Concrete Dams ", 9th ICOLD Congress, Vol. III, Q 34-R 29, Istanbul, 1967.
51. MARTNA J. : " Engineering Problems in Rocks Containing Pyrrhotite ", *Proceedings of the International Symposium on Large Permanent Underground Openings*, Oslo, 23-25th September 1969.

APPENDIX A/ANNEXE A
CASE HISTORIES/EXEMPLES

Afin d'établir l'importance et la nature de l'agression des barrages en béton par des agents extérieurs, un questionnaire a été diffusé parmi les pays membres. Les informations demandées étaient les suivantes :

- Pays
- Nom de l'aménagement
- Situation géographique
- Description de l'ouvrage
- Type d'agression
- Analyse de l'eau
- Intensité de l'agression
- Composition du béton détérioré
- Réparations exécutées ou préconisées
- Mesures préventives prises
- Existence de normes?
- Autres détails et références

Cette enquête, complétée par une étude bibliographique, révéla plus de cent exemples d'attaque chimique par des agents présents dans l'environnement. De plus, il est apparu qu'il existait bien d'autres cas n'ayant pas fait l'objet de publications, l'intensité des attaques ayant été jugée insignifiante jusqu'ici. Les attaques passent souvent inaperçues en l'absence de visites et de contrôles approfondis, avec mesures des sous-pressions et des débits de drainage, et analyses de l'eau. En site montagneux notamment, les détériorations du béton provoquées par l'eau pure (douce) sont souvent passées sous silence, car ici l'action du gel-dégel est considérée comme un problème bien plus important.

Les exemples cités dans les réponses sont résumés dans le Tableau L, suivi d'une liste de détails : nature de l'agression, mesures prises pour y faire face, analyses de l'eau. Certains exemples d'attaques survenues sur des usines électriques et des ouvrages en béton associés à des barrages en remblai figurent également dans cette liste.

En cas de discordance dans les caractéristiques des barrages (hauteur, année de construction, etc.) entre les réponses au questionnaire et le Registre Mondial des Barrages, ce dernier fait foi (édition 1984). Les abréviations utilisées ici sont celles du Registre :

- TE : barrage en terre
- ER : barrage en enrochement
- PG : barrage-poids en béton
- CB : barrage à contreforts
- VA : barrage-voûte
- MV : barrage à voûtes multiples

Deux autres ont été ajoutées :

- X : barrage mobile
- PS : centrale hydro-électrique

In order to establish the extent and nature of aggressive environmental attack on concrete dams, a questionnaire was circulated to member countries. Details requested were :

- Country
- Name of Scheme
- Location
- Description of Structure
- Type of Attack
- Water Analysis
- Severity of Attack
- Mix Designs of Affected Concrete
- Remedial Measures Taken or Specified
- Preventive Measures Taken
- What Standards Exist?
- Further Details and References

The replies were supplemented by a literature search and altogether produced over a hundred examples of environmental, chemical attack. Furthermore it became clear that far more examples exist but have not been documented as the degree of attack does not currently represent a problem. In many cases the extent of chemical attack may remain undetected unless full surveys and inspections have been carried out and aspects like drainage flows, water analyses and uplift pressures properly monitored. In other cases, particularly those at high altitude, concrete deterioration by pure (soft) water is often not recorded specifically as it appears as a lesser problem than that of freeze-thaw action.

The case histories are summarised briefly in Table L. This is followed by a detailed listing with fuller details of the type of attack, remedial measures taken and details of water analyses where available. Cases of attack in power stations and concrete works associated with earth dams have also been included as relevant to the study.

In some cases the details supplied of dam height, year of construction etc., were at slight variance with similar details in the World Register of Dams (1984 Ed.). In such cases the World Register was taken as being definitive. Abbreviations used for type of dam follow those in the World Register as follows :

- TE : Earth
- ER : Rockfill
- PG : Concrete Gravity
- CB : Buttress
- VA : Arch
- MV : Multi-Arch

These have been supplemented by two more cases :

- X : Mobile
- PS : Power Station

Dans les réponses, les informations concernant les analyses de l'eau sont très variables en quantité, en nature et en terminologie. Aussi les a-t-on réduites, dans le résumé, pour faire apparaître plus systématiquement les précisions suivantes :

TSD : teneur totale en matières solides dissoutes

Ca : calcium

Mg : magnésium

Na : sodium

K : potassium

SO₄ : sulfate

Cl : chlore

pH : valeur du pH

IL : indice de saturation Langelier

DT : dureté totale

DP : dureté permanente

DTp : dureté temporaire

DCa : dureté due au calcium

Il est à noter que la terminologie décrivant la nature de l'attaque, dans le Tableau L, est celle relevée dans les réponses; celles-ci ne précisent pas toujours la cause de l'attaque.

Les exemples font état de différents types d'attaque et de mesures pour y faire face, et sont reproduits dans les paragraphes correspondants du texte principal du Bulletin.

La répartition des exemples par décennie de construction des ouvrages apparaît sur la Fig. 16.

The details supplied of chemical analyses varied greatly, both in extent and nature of information and in the terms used. They have been rationalised for the purposes of inclusion in the detailed descriptions of attack to the following main aspects (where available) :

- TDS : Total Dissolved Solids
- Ca : Calcium
- Mg : Magnesium
- Na : Sodium
- K : Potassium
- SO₄ : Sulphate
- Cl : Chlorine
- pH : pH value
- LI : Langelier Saturation Index
- Tot. H : Total Hardness
- Perm. H : Permanent Hardness
- Temp. H : Temporary Hardness
- Ca. H : Calcium Hardness

It should also be noted that the terms used in Table L to describe the form of attack generally follow those given in the questionnaire replies though these are not always precise as to the exact cause of the attack.

The case histories feature various types of attack and remedial measures, and are reflected in the various appropriate sections of the main text of the Bulletin. The distribution of the case histories by decade is shown in Fig. 16.

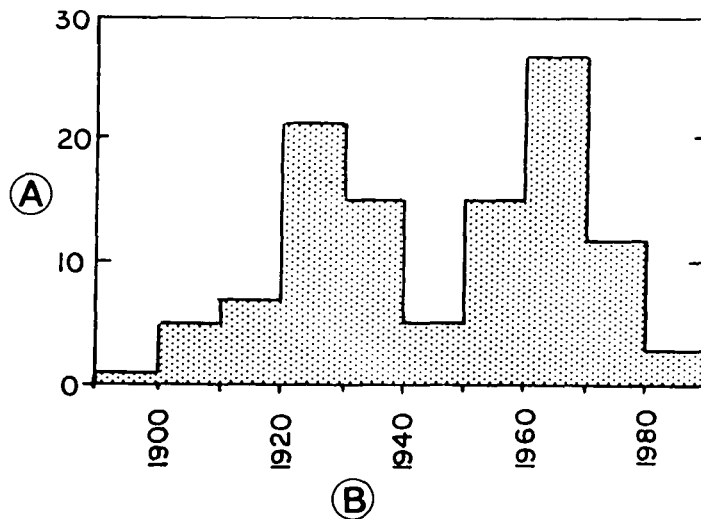


Fig. 16

Histogram of number of case histories by decade of construction.

Histogramme du nombre d'exemples par décennie de construction.

- (A) Number of cases
- (B) Period of construction

- (A) *Nombre de cas*
- (B) *Période de construction*

Tableau L. — Liste des exemples.

N°	Barrage	Pays	Type	H (m)	Année	Réf. (*)	Type d'agression	Type de réparation
A 1	Agger	Allemagne	PG	45	1929	23, 47	Eau agressive (douce), teneur élevée en CO ₂	Masque en béton. Injection
A 2	Aigueblanche	France	X	28	1954	47, Q	Sulfates	Galerie de drainage
A 3	Almahagilish	Grande-Bretagne (Irlande du Nord)	PG	42	1934	Q	Eau douce	Injection. Remblai d'appui
A 4	Alvin R. Bush	USA	TE	50	1962	Q	Eau agressive (douce?)	Géomembrane
A 5	Arno	Italie	PG	40	1917	43	Eau pure (douce)	Masque en béton
A 6	Asswan	Egypte	PG	53	1902	48	Eau agressive (douce?)	Injection
A 7	Avio	Italie	PG	40	1929	43	Eau pure (douce)	Masque en béton
A 8	Avon	Australie	VA/PG	72	1927	21, 22	Eau douce	Injection. Drainage. Remblai d'appui
B 1	Bangala	Zimbabwe	VA	51	1963	Q	Eau douce	—
B 2	Ben Etieue	Afrique du Sud	PG	21	1969	Q	Eau douce	—
B 3	Beervlei	Afrique du Sud	MV	31	1957	47, Q	Sulfate	Mortier d'époxy. Bitume
B 4	Buchanan	USA	TE	66	1973	Q	Alcide sulfurique (provenant de H ₂ S)	—
B 5	Buckhorn Lake	USA	ER	49	1960	Q	Eau acide	—
B 6	Burrinjuck	Australie	PG	79	1927	47	Eau douce	Injection. Drainage
B 7	Busin	Italie	PG	22	1923	Q	Eau pure (douce), teneur élevée en CO ₂	Gunitte. Masque en béton
C 1	Cactus Poort	Zimbabwe	PG	18	1944	Q	Eau douce	—
C 2	Caillaouas	France	PG	22	1951	47, Q	Eau douce	Injection (ciment, résine)
C 3	Campiccioli	Italie	PG	70	1928	Q	Eau pure (douce), teneur élevée en CO ₂	Masque en béton
C 4	Cancano	Italie	VA	136	1955	19	Eau pure (douce)	—
C 5	Caspe	Espagne	PG	37	1963	Q	Gaz sulfureux	Ventilation. Peinture époxy
C 6	Cavallers	Espagne	CB	70	1960	Q	Eau pure (douce)	Injection d'époxy
C 7	Cedar Falls	USA	PG	70	1914	Q	Eau douce	Masque en béton (en projet)
C 8	Chief Joseph	USA	PG	72	1955	Q	Eau douce	—
C 9	Cignana	Italie	PG	58	1928	47, Q	Eau douce, teneur élevée en CO ₂	Géomembrane
C 10	Cingino	Italie	PG	46	1930	Q	Eau douce, teneur élevée en CO ₂	Masque en tôle
C 11	Clendening	USA	TE	20	1935	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S + bactéries)	Etude en cours
C 12	Columbia Lock	USA	PG	—	1972	Q	Eau agressive (douce?)	—
C 13	Conemaugh	USA	PG	52	1952	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	—
C 14	Coolumda	Australie	TE	20	1968	Q	Eau agressive (douce?)	—
C 15	Croendal	Afrique du Sud	VA	45	1935	47	Eau agressive (« acide »)	—
D 1	Deep Creek	Nouvelle-Zélande	PG	3	1936	Q	Eau douce (« acide »)	—
D 2	Delta	USA	PG	30	1912	37	Eau douce	Injection. Massif de butée. Tirants. Gunitte. Masques en béton

(*) Les chiffres renvoient au Chapitre 9 « Références ». Q = réponse au Questionnaire.

Table L. — List of case histories.

No.	Dam	Country	Type	H (m)	Year	Réf. (*)	Type of attack	Type of repair
A 1	Agger	Germany	PG	45	1929	23, 47	Aggressive (soft) water, high CO ₂	Concrete facing, Grouting
A 2	Aigueblanche	France	X	28	1954	47, Q	Sulphate	Drainage tunnel
A 3	Altnahelligish	Great Britain (N. Ireland)	PG	42	1934	Q	Soft water	Grouting, Supporting embankment
A 4	Alvin R. Bush	USA	TE	50	1962	Q	Aggressive (soft?) water	Geomembrane
A 5	Arno	Italy	PG	40	1917	43	Pure (soft) water	Concrete facing
A 6	Asswan	Egypt	PG	53	1902	48	Aggressive (soft?) water	Grouting
A 7	Avio	Italy	PG	40	1929	43	Pure (soft) water	Concrete facing
A 8	Avon	Australia	VA/PG	72	1927	21, 22	Soft water	Grouting, Drainage, Supporting embankment
B 1	Bangala	Zimbabwe	VA	51	1963	Q	Soft water	—
B 2	Ben Etieue	South Africa	PG	21	1969	Q	Soft water	—
B 3	Beervlei	South Africa	MV	31	1957	47, Q	Sulphate	Epoxy mortar, Bitumen
B 4	Buchanan	USA	TE	66	1973	Q	Sulphuric Acid (from H ₂ S)	—
B 5	Buckhorn Lake	USA	ER	49	1960	Q	Acid water	—
B 6	Burrinjuck	Australia	PG	79	1927	47	Soft water	Grouting, Drainage
B 7	Busin	Italy	PG	22	1923	Q	Pure (soft) water, high CO ₂	Gunite, Concrete facing
C 1	Cactus Poort	Zimbabwe	PG	18	1944	Q	Soft water	—
C 2	Caillaouas	France	PG	22	1951	47, Q	Soft water	Cement and resin grouting
C 3	Campliccioli	Italy	PG	70	1928	Q	Pure (soft) water, high CO ₂	Concrete facing
C 4	Cancano	Italy	VA	136	1955	19	Pure (soft) water	—
C 5	Caspe	Spain	PG	37	1963	Q	Sulphurous Gas	Ventilation, Epoxy paint
C 6	Cavallers	Spain	CB	70	1960	Q	Pure (soft) water	Epoxy grouting
C 7	Cedar Falls	USA	PG	70	1914	Q	Soft water	Concrete facing planned
C 8	Chief Joseph	USA	PG	72	1955	Q	Soft water	—
C 9	Cignana	Italy	PG	58	1928	47, Q	Soft water, high CO ₂	Geomembrane
C 10	Cingino	Italy	PG	46	1930	Q	Soft water, high CO ₂	Iron plate facing
C 11	Clendening	USA	TE	20	1935	Q	Sulphuric Acid (from H ₂ S + bacteria)	Under review
C 12	Columbia Lock	USA	PG	—	1972	Q	Aggressive (soft?) water	—
C 13	Conemaugh	USA	PG	52	1952	Q	Acid (from coal mining)	—
C 14	Coolurnda	Australia	TE	20	1968	Q	Aggressive (soft?) water	—
C 15	Croendal	South Africa	VA	45	1935	47	Aggressive (« acidic ») water	—
D 1	Deep Creek	New Zealand	PG	3	1936	Q	Soft (« acidic ») water	—
D 2	Delta	USA	PG	30	1912	37	Soft water	Grouting, Thrust block, Stressing, Guniting, Concrete facings.

(*) Numbers refer to Chapter 9 « References ». Q means reply to Questionary.

N°	Barrage	Pays	Type	H (m)	Année	Réf. (*)	Type d'agression	Type de réparation
D 3	Dinas	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	VA	23	1961	Q	Eau douce	Enduit
D 4	Dindinnie	Grande-Bretagne (Écosse)	PG	17	1907	Q	Eau douce, acide	Masque en béton. Injection
D 5	Drum Afterbay	USA	VA	29	1924	9	Sulfate, lessivage	Démolition du barrage
D 6	Duivnhoks	Afrique du Sud	VA	45	1965	Q	Eau douce	—
D 7	Dutchmans Pool	Zimbabwe	CB	22	1954	47, Q	Eau douce	Injection
E 1	Eben	Zimbabwe	TE	25	1969	Q	Eau douce	—
E 2	El Atazar	Espagne	VA	134	1972	Q	Acide sulfurique + bactéries	Résine
E 3	El Chocon	Argentine	TE	74	1973	Q	Sulfate	Fort dosage en ciment et E/C faible dans le béton d'origine
E 4	Empingham	Grande-Bretagne (Angleterre)	TE	40	1975	40	Sulfure	Peinture époxy
E 5	Esquilingwe	Zimbabwe	CB	14	1945	Q	Eau douce	—
F 1	Fall Creek	USA	ER	62	1965	Q	Eau douce	—
F 2	Farmers Creek (Lithogow No. 2)	Australie	VA	27	1907	Q	Lessivage (eau douce?)	Béton projeté
F 3	Fort Peck	USA	TE	76	1937	47, Q	Sulfate	—
G 1	Garichte	Suisse	PG	18/42	1931	26	Eau douce	Injection
G 2	Girotte	France	MV	48	1948	40, 47, Q	Eau douce	Revêtement de résine
G 3	Glen Canyon	USA	VA	216	1966	47	Sels de déneigement	Époxy
G 4	Green River Lake	USA	TE	44	1969	Q	Eau acide	—
G 5	Gurzia	Italie	VA	49	1925	Q	Eau douce	Revêtement de résine
G 6	Gyfyfyns	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	PG	—	1927	33	Eau douce, tourbeuse	Injection. Gunite. Masque en béton. Remblai d'appui
H 1	Haweswater	Grande-Bretagne (Angleterre)	CB	33	1941	Q	Eau douce	—
H 2	Hendrer Mur	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	PG	15	1926	33	Eau douce, tourbeuse	Gunite. Masque en béton. Remblai d'appui
H 3	Hidden	USA	TE	56	1975	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S)	—
J 1	Janov	Tchécoslovaquie	PG	53	1914	24	Eau douce	—
J 2	Jonesville	USA	PG	—	1972	Q	Eau agressive (douce?)	—
J 3	Écluse et barrage J. Percy Priest	USA	TE	40	1967	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S)	Ventilation
K 1	Korinte-Vette	Afrique du Sud	VA	34	1965	Q	Eau agressive (douce?)	—
K 2	Kossou	Côte d'Ivoire	—	58	1972	40	« Attaque chimique » (?)	—
K 3	Kyle	Zimbabwe	VA	67	1960	Q	Eau douce	Revêtement de résine

No.	Dam	Country	Type	H (m)	Year	Ref. (*)	Type of attack	Type of repair
D 3	Dinas	Great Britain (Wales)	VA	23	1961	Q	Soft water	Rendering
D 4	Dindinnie	Great Britain (Scotland)	PG	17	1907	Q	Soft, acidic water	Concrete facing. Grouting
D 5	Drum Afterbay	USA	VA	29	1924	9	Sulphate, leaching	Dam demolished
D 6	Duivnhoks	South Africa	VA	45	1965	Q	Soft water	—
D 7	Dutchmans Pool	Zimbabwe	CB	22	1954	47, Q	Soft water	Grouting
E 1	Eben	Zimbabwe	TE	25	1969	Q	Soft water	—
E 2	El Atazar	Spain	VA	134	1972	Q	Sulphuric acid + bacteria	Resin (High cement and low w/c ratio used in construction)
E 3	El Chocon	Argentina	TE	74	1973	Q	Sulphate	Epoxy paint
E 4	Empingham	Great Britain (England)	TE	40	1975	40	Sulphide	—
E 5	Esquilwge	Zimbabwe	CB	14	1945	Q	Soft water	—
F 1	Fall Creek	USA	ER	62	1965	Q	Soft water	—
F 2	Farmers Creek (Lithogow No. 2)	Australia	VA	27	1907	Q	Leaching (soft water?)	Shotcrete
F 3	Fort Peck	USA	TE	76	1937	47, Q	Sulphate	—
G 1	Garichte	Switzerland	PG	18/42	1931	26	Soft water	Grouting
G 2	Girotte	France	MV	48	1948	40, 47, Q	Soft water	Resin facing
G 3	Glen Canyon	USA	VA	216	1966	47	De-icing salts	Epoxy
G 4	Green River Lake	USA	TE	44	1969	Q	Acid water	—
G 5	Gurzia	Italy	VA	49	1925	Q	Soft water	Resin facing
G 6	Gyfyfyns	Great Britain (Wales)	PG	—	1927	33	Soft, peaty, water	Grouting. Gunite. Concrete facing. Supporting embankment
H 1	Haweswater	Great Britain (England)	CB	33	1941	Q	Soft water	—
H 2	Hendrer Mur	Great Britain (Wales)	PG	15	1926	33	Soft, peaty, water	Gunite. Concrete facing. Supporting embankment
H 3	Hidden	USA	TE	56	1975	Q	Sulphuric Acid (from H ₂ S)	—
J 1	Janov	USA	PG	53	1914	24	Soft water	—
J 2	Jonesville Lock and dam	Chzechoslovakia USA	PG	—	1972	Q	Aggressive (soft?) water	—
J 3	J. Percy Priest	USA	TE	40	1967	Q	Sulphuric Acid (from H ₂ S)	Ventilation
K 1	Korinte-Vette	South Africa	VA	34	1965	Q	Aggressive (soft?) water	—
K 2	Kossou	Ivory Coast	—	58	1972	40	« Chemical (?) attack »	Resin facing
K 3	Kyle	Zimbabwe	VA	67	1960	Q	Soft water	—

N°	Barrage	Pays	Type	H (m)	Année	Ref. (*)	Type d'agression	Type de réparation
L 1	Lake Spaulding	USA	VA	84	1913	Q	Eau douce	Gunite. Masque en béton. Remblai d'appui
L 2	Loyalhanna Lake	USA	PG	41	1942	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	—
M 1	Maentwrog	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	VA	31	1926	33	Eau douce, tourbeuse	Injection. Gunite. Masque en béton
M 2	Manjirenji	Zimbabwe	ER	51	1967	Q	Eau douce	—
M 3	Marunuma	Japon	CB	32	1930	49	Eau douce	Injection. Masque bitumineux
M 4	Meguineza	Espagne	PG	81	1966	Q	Gaz sulfureux	Ventilation. Peinture époxy
M 5	Mononghela d & 1 No. 3	USA	—	—	1907	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	Béton projeté. Réfection importante
M 6	Mononghela d & 1 No. 4	USA	—	—	1932	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	Béton projeté. Réfection
M 7	Mononghela d & 1 No. 7	USA	—	—	1926	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	Béton projeté
M 8	Mononghela d & 1 No. 8	USA	—	—	1926	Q	Acide (provenant d'une mine de charbon)	Béton projeté. Réfection
M 9	Mount Morris	USA	PG	76	1952	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S + bactéries)	« Réparations locales par injection ». Ventilation et chasses recommandées
N 1	Nomeland	Norvège	PG	27	1921	50	Eau douce	Revêtement de résine
N 2	North Poudre	USA	PG	7	1952	Q	Eau douce	Réparations locales au mortier
O 1	Ocoee (No. 1)	USA	PG	41	1911	Q	Attaque acide	Remise en état de la surface. Élimination des polluants
O 2	Odzani	Zimbabwe	VA	29	1965	Q	Eau douce	—
O 3	Okawela (Polgolla)	Sri Lanka	PS	—	1976	Q	Eau douce	—
O 4	Oritchella	Italie	VA	36	1928	Q	Eau douce à teneur élevée en CO ₂	Étude en cours
O 5	Owen Falls	Ouganda	PG	30	1954	Q	Eau douce	Epoxy. Étude en cours
P 1	Pack	Autriche	PG/TE	33	1931	40	Eau douce	Gunite. Injection
P 2	Painted Rock	USA	TE	55	1960	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S + bactéries)	—
P 3	Palawan	Zimbabwe	VA	52	1979	Q	Eau douce	—
P 4	Piedmont Lake	USA	TE	17	1937	Q	Eau douce	—
R 1	Rasqao	Brésil	PG/VA	26	1925	12	Seils de déneigement (chlorure)	Dérivation des écoulements
R 2	Raystown Lake	USA	TE	69	1973	Q	Sulfates, nitrates, CO ₂	Injection à l'époxy
R 3	Ribarroja	Espagne	PG	60	1969	Q	Gaz sulfureux	Ventilation. Peinture époxy
R 4	Rimasco	Italie	VA	31	1925	Q	Eau douce	Revêtement de résine
K 5	Ringedal	Norvège	PG	33	1916	21, 42	Eau douce	Injection. Masque en béton étrépillonné

No.	Dam	Country	Type	H (m)	Year	Ref. (*)	Type of attack	Type of repair
L 1	Lake Spaulding	USA	VA	84	1913	Q	Soft water	Gunite. Concrete facing. Supporting embankment
L 2	Loyalhanna Lake	USA	PG	41	1942	Q	Acid (from coal mining)	—
M 1	Maentwrog	Great Britain (Wales)	VA	31	1926	33	Soft, peaty, water	Grouting. Gunite. Concrete facing
M 2	Manjirenji	Zimbabwe	ER	51	1967	Q	Soft water	—
M 3	Marunuma	Japan	CB	32	1930	49	Soft water	Grouting. Asphaltic facing
M 4	Meguineza	Spain	PG	81	1966	Q	Sulphurous Gas	Ventilation. Epoxy paint
M 5	Mononghela d & 1 No. 3	USA	—	—	1907	Q	Acid (from coal mining)	Shotcreting. Major reconstruction
M 6	Mononghela d & 1 No. 4	USA	—	—	1932	Q	Acid (from coal mining)	Shotcreting. Reconstruction
M 7	Mononghela d & 1 No. 7	USA	—	—	1926	Q	Acid (from coal mining)	Shotcreting
M 8	Mononghela d & 1 No. 8	USA	—	—	1926	Q	Acid (from coal mining)	Shotcreting. Reconstruction
M 9	Mount Morris	USA	PG	76	1952	Q	Sulphuric acid (from H ₂ S + bacteria)	« Grouting patching ». Ventilation and flushing recom.
N 1	Nomeland	Norway	PG	27	1921	50	Soft water	Resin facing
N 2	North Poudre	USA	PG	7	1952	Q	Soft water	Mortar patching
O 1	Ocoee (No. 1)	USA	PG	41	1911	Q	Acid attack	Re-surfacing + pollutant control
O 2	Odzani	Zimbabwe	VA	29	1965	Q	Soft water	—
O 3	Okawela (Polgolla)	Sri Lanka	PS	—	1976	Q	Soft water	—
O 4	Orichella	Italy	VA	36	1928	Q	Soft water high in CO ₂	Under review
O 5	Owen Falls	Uganda	PG	30	1954	Q	Soft water	Epoxy. Under review
P 1	Pack	Austria	PG/TE	33	1931	40	Soft water	Gunite. Grouting
P 2	Painted Rock	USA	TE	55	1960	Q	Sulphuric acid (from H ₂ S + bacteria)	—
P 3	Palawan	Zimbabwe	VA	52	1979	Q	Soft water	—
P 4	Piedmont Lake	USA	TE	17	1937	Q	De-icing salts (chloride)	Diversion of drainage
R 1	Rasqao	Brazil	PG/VA	26	1925	12	Sulphates, nitrates, CO ₂	Under review
R 2	Raystown Lake	USA	TE	69	1973	Q	Soft water	Epoxy Grout
R 3	Ribarroja	Spain	PG	60	1969	Q	Sulphurous Gas	Ventilation. Epoxy paint
R 4	Rimasco	Italy	VA	31	1925	Q	Soft water	Resin facing
R 5	Ringedal	Norway	PG	33	1916	21, 42	Soft water	Grouting. Propped concrete facing wall

N°	Barrage	Pays	Type	H (m)	Année	Réf. (*)	Type d'agression	Type de réparation
R 6	Rochon	Seychelles	VA	34	1969	Q	Eau douce	—
R 7	Roode Elsberg	Afrique du Sud	VA	72	1968	Q	Eau douce (?)	—
S 1	Salarno	Italie	PG	40	1928	43	Eau douce	Masque en béton
S 2	S. Giacomo de fraele	Italie	CB	92	1951	19	Eau douce	« Produit d'étanchement »
S 3	Seminole	USA	VA	90	1939	Q	Sulfate	—
S 4	Siya	Zimbabwe	TE	66	1976	Q	Eau douce	—
S 5	Spring Creek Debris Dam	USA	TE	60	1963	40	Eau « acide »	—
S 6	Seathwaite Tarn	Grande-Bretagne (Angleterre)	PG	14	1907	Q	Eau douce	—
S 7	Serru	Italie	PG	45	1951	Q	Eau douce à teneur élevée en CO ₂	—
S 8	Storjuktan	Suède	TE	20	1963	51, Q	Sulfate	(Ciment type V + pouzzolanes dans le béton d'origine)
S 9	Stornorrfos	Suède	PS	—	1956	51, Q	Sulfate (sur CPA seulement)	(Ciment type V et également CPA, dans le béton d'origine)
S 10	Suurva	Suède	MV	22	1920	38, 40, Q	Eau douce (au barrage construit ultérieurement : sulfate)	Gumite. Masque en béton. Revêtement de résine
T 1	Tamagawa	Japon	PG	100	(1987 c)	35	Acide	Traitement de l'eau
T 2	Tappan Lake	USA	TE	16	1936	Q	Acide sulfurique (provenant de H ₂ S + bactéries)	Étude en cours
T 3	Teifi Pools	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	PG	4,4	1960	Q	Eau douce	Réparations locales au mortier
T 4	Thees-waterskloof	Afrique du Sud	TE	38	1980	Q	Eau douce	Essais d'enduits
T 5	Tinfos	Norvège	VA	11	1955	50	Eau agressive (douce?)	Revêtement de résine
T 6	Toggia	Italie	PG	44	1932	Q	Sulfate	Masque en béton
T 7	Trawsfynydd	Grande-Bretagne (Pays de Galles)	PG	12	1926	33	Eau douce, tourbeuse	Enduit. Gumite. Masque en béton. Remblai d'appui
V 1	Valgrosina	Italie	PG	52	1960	19	Eau douce	—
V 2	Victoria	Australie	VA/PG	25	1891	40	Lessivage (eau douce?)	Masque en béton. Injection. Drainage
V 3	Victoria	Sri Lanka	VA	122	1984	Q	Eau douce	Enduit appliqué lors de la construction. Adoucissement de l'eau
W 1	Wyangala	Australie	PG	61	1936	40	Lessivage (eau douce?)	Drainage. Tirams. Recons-truction d'un barrage en terre
Z 1	Zvornik	Yougoslavie	PG	41	1955	40	Eau douce	Injection

(*) Les chiffres renvoient au Chapitre 9 « Références ». Q = réponse au Questionnaire.

No.	Dam	Country	Type	H (m)	Year	Réf. (*)	Type of attack	Type of repair
R 6	Rochon	Seychelles	VA	34	1969	Q	Soft water	—
R 7	Roode Elsberg	South Africa	VA	72	1968	Q	Soft water (?)	—
S 1	Salarino	Italy	PG	40	1928	43	Soft water	Concrete facing
S 2	S. Giacomo de fraele	Italy	CB	92	1951	19	Soft water	« Sealant »
S 3	Seminole	USA	VA	90	1939	Q	Sulphate	—
S 4	Siya	Zimbabwe	TE	66	1976	Q	Soft water	—
S 5	Spring Creek Debris Dam	USA	TE	60	1963	40	« Acidic » water	Resin facing
S 6	Seathwaite Tarn	Great Britain (England)	PG	14	1907	Q	Soft water	—
S 7	Serru	Italy	PG	45	1951	Q	Soft water, high in CO ₂	(Type V cement + pozzolan used in construction)
S 8	Storjuktan	Sweden	TE	20	1963	51, Q	Sulphate	(Type V cement and also OPC used in construction)
S 9	Stornorrfos	Sweden	PS	—	1956	51, Q	Sulphate (on OPC only)	Gunité. Concrete facing. Resin facing
S 10	Suurva	Sweden	MV	22	1920	38, 40, Q	Soft water (sulphate on later dam)	Water treatment
T 1	Tamagawa	Japan	PG	100	(1987 c)	35	Acid	Under review
T 2	Tappan Lake	USA	TE	16	1936	Q	Sulphuric acid (from H ₂ S + bacteria)	Mortar patching
T 3	Teifi Pools	Great Britain (Wales)	PG	4,4	1960	Q	Soft water	Coating trials
T 4	Thees-waterskloof	South Africa	TE	38	1980	Q	Soft water	Resin facing
T 5	Tinfos	Norway	VA	11	1955	50	Aggressive (soft?) water	Concrete facing
T 6	Toggia	Italy	PG	44	1932	Q	Sulphate	Rendering. Gunité.
T 7	Trawsfynydd	Great Britain (Wales)	PG	12	1926	33	Soft, peaty, water	Concrete facing. Supporting embankment
V 1	Valgrosina	Italy	PG	52	1960	19	Soft water	—
V 2	Victoria	Australia	VA/PG	25	1891	40	Leaching (soft water?)	Concrete facing. Grouting. Drainage
V 3	Victoria	Sri Lanka	VA	122	1984	Q	Soft water	Rendering during construction. Water softening
W 1	Wyangala	Australia	PG	61	1936	40	Leaching (soft water?)	Drainage. Post tensioned ties. Dam reconstructed as Earthfill
Z 1	Zvornik	Yugoslavia	PG	41	1955	40	Soft water	Grouting

(*) Numbers refer to Chapter 9 « References ». Q means reply to Questionary.

DESCRIPTION DES ATTAQUES DU BÉTON ET DES TRAVAUX DE RÉPARATION

(Les numéros des repères renvoient au Tableau L)

- A 1 L'érosion et la détérioration du béton par l'action d'eau agressive à forte teneur en CO₂, ainsi que les désordres provoqués par le gel, ont conduit à un débit de fuites inacceptable. De plus, le béton initial présentait un excès de fines et d'eau de gâchage, d'où un taux excessif de vides et de capillaires.
- 1958 : Échec du mastic bitumineux utilisé comme enduit étanche sur la partie inférieure du barrage; puis étanchement partiel par injections.
- 1966 : Masque en béton bitumineux (ép. 120 mm) sur l'ensemble du parement amont, protégé à l'amont par une dalle en béton armé (ép. 280 mm) ancrée au barrage.
- A 2 Le barrage est construit essentiellement avec du béton de ciment Portland CPA mais, compte tenu de la nature séléniteuse du rocher, la partie centrale est fondée sur une couche de béton de propreté, au ciment de laitier, de 15 cm d'épaisseur. L'absence de ce béton de propreté sur les appuis latéraux du barrage a exposé le béton, dans ces zones, à l'action des sulfates, notamment en rive gauche.
- 1956 : Exécution d'une galerie de drainage évacuant l'eau hors de cette zone. Les forages de contrôle ont montré que le contact béton/rocher était resté sain.
- A 3 Détérioration de surface (ép. 80 mm) due à l'action d'eau douce de pH égal à 5, provenant de landes tourbeuses. Dépôts de calcium dans les galeries et sur le parement aval. Le béton initial du barrage comporte des granulats de qualité médiocre, trop riches en fines, avec, pour conséquences, un rapport E/C élevé et un béton de qualité médiocre.
- 1967 : Injections et abaissement de 1,8 m du niveau de retenue, compte tenu des fortes sous-pressions détectées.
- 1986 : Travaux destinés à rétablir la sécurité du barrage et le niveau de retenue normale : nouveau rideau d'injection, drains de décompression, remblai d'appui à l'aval.
- A 4 Détérioration de surface du béton (ép. 25 mm) sur l'ouvrage de prise de la conduite de by-pass. L'eau agressive attaque de préférence les gros granulats carbonatés, découvrant les granulats fins siliceux, restant en place.
- Les zones endommagées ont été nettoyées par sablage et enduites de résines époxy.
- A 5 Débits de percolation élevés dus à la détérioration du béton du masque Lévy par l'action de l'eau très pure provenant d'un lac glaciaire en haute montagne.
- 1966 : Remplacement du masque Lévy par un nouveau masque en béton (ép. 1,5 à 4,0 m), ancré au barrage et comportant un réseau important de drains de décharge et de galeries d'évacuation.
- A 6 La décomposition du mortier entre les plots en maçonnerie du barrage, par l'action des eaux agressives du Nil, a conduit à un débit de percolation important et à des sous-pressions inacceptables.
- 1961 : Injection, sur toute la longueur du barrage, d'un voile d'étanchéité à proximité du parement amont et prolongé dans la fondation : coulis au ciment de laitier ou mélange de CPA (83 %) et de Kieselguhr (17 %). Chaque coulis était résistant aux eaux agressives.
- A 7 Débits de percolation élevés résultant de la détérioration des masques Lévy par l'action des eaux très pures provenant d'un lac glaciaire de haute montagne.
- 1957 : Injections et construction d'un nouveau masque en béton (ép. 1,5 à 4,0 m) ancré au barrage, associé à un réseau important de drains de décharge et de galeries d'évacuation.
- A 8 Les désordres (augmentation des fuites, sous-pressions, détérioration du béton résultant de l'élimination de la chaux par l'eau douce et agressive) ont nécessité des travaux importants pour rétablir la sécurité. Une campagne de sondages, complétée par une série d'analyses chimiques, ont confirmé la nature et l'importance de la détérioration.
- 1969 : Nouveaux rideau d'injection dans la fondation et réseau de drainage dans la fondation. Consolidation du barrage par construction d'un remblai d'appui aval. Abaissement du niveau de

SPECIFIC DETAILS OF CONCRETE ATTACKS AND REMEDIAL WORKS

(Reference Nos. as those in Table L)

- A 1 Concrete erosion and deterioration by aggressive water, high in CO₂, coupled with frost damage, led to excessive leakage. Furthermore the original dam concrete mix was overhigh in fines and water content leading to excessive pores and capillaries.
- 1958 : Unsuccessful surface sealing of lower parts by a mastic asphalt facing, later partial sealing by grouting.
- 1966 : Asphaltic concrete 120 mm thick applied over whole upstream face and protected upstream by a reinforced concrete slab 280 mm thick anchored back into the main dam.
- A 2 The main dam concrete used ordinary Portland cement, however, in view of selenitic rock conditions, the centre section of the dam was founded on a 15 cm layer of slag-cement blinding concrete. This layer was omitted over the abutments which led to the main dam concrete in those areas being subjected to sulphate attack, particularly on the left bank.
- 1956 : A drainage tunnel was driven to divert water away from the affected area and subsequent borings showed that the concrete/rock contact had remained sound.
- A 3 Surface deterioration of approx 80 mm due to attack by soft water, with a pH of 5, from peaty moorland. Deposition of calcium in galleries and downstream face. The dam concrete mix used poor aggregate with excessive fines. This led to a high water cement ratio and low quality concrete.
- 1967 : High uplift pressures led to remedial grouting and the reservoir level being reduced by 1.8 m.
- 1986 : New grout curtain, pressure relief drains and a supporting downstream rockfill embankment to restore previous reservoir level and safety factors.
- A 4 Surface attack to a depth of 25 mm to the concrete of the bypass pipe intake structure. Aggressive water had preferentially attacked the carbonate coarse aggregate, leaving the siliceous fine aggregates standing in relief.
- Affected areas were sand blasted, then coated with epoxy resin.
- A 5 High seepages resulting from concrete deterioration of Levy-type facings due to the action of very pure, high altitude, glacial lake water.
- 1966 : Replacement of Levy facing by construction of a new concrete face, varying in thickness from 1.5 m to 4.0 m, anchored to the main dam and provided with an extensive network of relief drains and collector galleries.
- A 6 Decomposition of mortar between masonry blocks of the original dam, under the action of aggressive Nile water, led to significant seepage through the dam and the build-up of unacceptable uplift pressures.
- 1961 : Remedial grout curtain formed over entire dam, close to the upstream face and continuing into the foundations. Grouting used slag cement or alternatively a mixture of 83 % OPC and 17 % Kieselguhr. Both gave resistance to aggressive attack.
- A 7 High seepages resulting from concrete deterioration of Levy-type facings due to the action of very pure, high altitude, glacial lake water.
- 1957 : Remedial grouting and the replacement of Levy facing by construction of a new concrete face, varying in thickness from 1.5 m to 4.0 m, anchored to the main dam and provided with an extensive network of relief drains and collector galleries.
- A 8 Increased leakage, uplift and concrete deterioration due to removal of lime by aggressive, soft water led to considerable remedial work to re-establish adequate safety factors. Drilling investigations supplemented by chemical analyses confirmed the nature and extent of the deterioration.
- 1969 : A new foundation grout curtain and foundation drainage system were established. The main dam wall was strengthened by the construction of a supporting, downstream embankment. The

retenue normale de 1,22 m et forages depuis le couronnement jusqu'à la galerie inférieure pour constituer un réseau de drainage.

- B 1 Agression par l'eau douce sur une profondeur de 10 à 20 mm. Mise à nu des gros granulats, dissolution éventuelle du coulis de ciment.

DT = 10 à 40 mg/l
Ca = 2 à 12 mg/l

- B 2 Parement amont et déversoir atteints par l'action de l'eau douce. Granulats visibles à l'œil sur le déversoir.

TSD = 24 mg/l
IL = - 6,1
pH = 4,9

- B 3 Détérioration, sur une épaisseur de 15 mm, du parement amont des voûtes, dans la zone le plus souvent immergée (tiers inférieur). A l'aval, détérioration sur une hauteur de 500 mm au-dessus du terrain humide. Détérioration des entonnements des prises sur une épaisseur de 15 à 20 mm, parfois 100 mm, découvrant les armatures. Détérioration par l'action des sulfates malgré l'importation spéciale de ciment sursulfaté lors des travaux de construction.

Pour la réparation des entonnements, on a eu recours au mortier époxy. La zone inférieure (2 m) du parement amont fut revêtue initialement de bitume, mais ce revêtement se décolla après un certain temps.

TSD = 1 566 mg/l
Na = 407 mg/l
Mg = 54 mg/l
SO₄ = 310 mg/l
Ca = 66 mg/l
Cl = 596 mg/l
IL = - 0,26

- B 4 Conduit atteint par l'attaque de l'acide sulfurique, notamment à l'amont des vannes de garde, sur une épaisseur de 3 mm. L'acide provenait de l'hydrogène sulfuré produit par la décomposition de végétation et de sols organiques laissés en place lors du déboisement du site.

- B 5 Béton du conduit et du bassin de dissipation atteint sur une épaisseur de 10 à 30 mm, par les eaux acides; quelques détériorations des granulats.

- B 6 Percolations excessives à travers le barrage par suite du lessivage du ciment par l'eau douce; sous-pressions élevées.

Reconnaitances : carottages et analyses chimiques.

Travaux : injections à proximité du parement amont; réseau de drainage à l'aval immédiat; galeries de drainage et d'évacuation des eaux de percolation, dans le rocher, sous le barrage.

- B 7 Percolations à travers le barrage et détérioration du mortier par l'action de l'eau pure, à forte teneur en CO₂, associée à l'action du gel.

1962 : Revêtement en gunite; par la suite, ce revêtement a été totalement détruit par le gel.

1985 : Masque amont en béton de ciment aux pouzzolanes, ép. mini : 0,6 m.

DTp = 20 mg/l
DP = 0 mg/l
pH = 7,4.

Très faible teneur en sels dissous.

- C 1 Lessivage du béton par l'eau douce sur une profondeur moyenne de 10 mm, parfois 30 mm. Dissolution très importante dans les zones alvéolaires.

DT = 73,5 mg/l
Ca = 14 mg/l
CO₂ = 11 mg/l
pH = 7,1

reservoir full supply level was temporarily lowered by 1.22 m and a drainage curtain was provided within the main body of the dam by drilling from the crest to the lower gallery.

- B 1 Soft water attack to a depth of 10 to 20 mm. Large aggregate exposed and possible dissolution of cement grout.

Tot. H = 10 to 40 mg/l
Ca = 2 to 12 mg/l

- B 2 Upstream face and overspill affected by soft water attack. Aggregate visible in side of overspill.

TDS = 24 mg/l
LI = - 6.1
pH = 4.9

- B 3 Deterioration of arches upstream where most in contact with water (lower third of dam) to a depth of 15 mm. Deterioration downstream to a height of 500 mm above moist ground. Deterioration of inlet portals to a depth of 15 to 20 mm but in places reaching 100 mm with exposure of reinforcement. Deterioration due to sulphate attack although supersulphated cement was specially imported for construction of the dam.

Inlet portals repaired with epoxy mortar. The lower 2 m of the upstream face was originally coated with bitumen, however, this subsequently peeled off.

TDS = 1 566 mg/l
Na = 407 mg/l
Mg = 54 mg/l
SO₄ = 310 mg/l
Ca = 66 mg/l
Cl = 596 mg/l
LI = - 0.26

- B 4 Conduit, mainly upstream of emergency gates, affected to a depth of 3 mm by sulphuric acid attack. This in turn was caused by sulphide gas from decomposition of vegetation and organic soils left during initial site clearance.

- B 5 Conduit and stilling basin concrete affected to a depth of 10 to 30 mm by acid water attack, also some deterioration of aggregate.

- B 6 Excessive seepage through the dam due to cement leaching by soft water, also the development of high uplift pressures.

Core drilling and chemical analyses were carried out.

A grouted zone was provided near the upstream face and a drainage curtain drilled immediately downstream of it. Drainage collector galleries were excavated in the rock beneath the dam.

- B 7 Seepage through dam body and deterioration of mortar by pure water, high in dissolved CO₂, coupled with frost action.

1962 : A gunite facing constructed, later completely destroyed by frost action.

1985 : Construction of a new pozzolanic cement concrete upstream facing of minimum thickness 0.6 m.

Temp. H = 20 mg/l
Perm. H = 0 mg/l
pH = 7.4
V. low in dissolved salts.

- C 1 Soft water attack leaching concrete to a depth of 10 mm on average but up to 30 mm in places. Considerable dissolution in areas of honeycombing.

Tot. H = 73.5 mg/l
Ca = 14 mg/l
CO₂ = 11 mg/l
pH = 7.1

- C 2 Détérioration importante du mortier du béton du barrage par l'action de l'eau douce provenant des zones de haute montagne. Sur le parement aval, on a observé des vides centimétriques et une humidité généralisée. Les détériorations du parement et des joints étaient plus marquées vers la partie inférieure du barrage, où la pression hydrostatique est maximale.
- 1971 : Réalisation d'un voile d'étanchéité dans le barrage par injection de coulis de ciment.
- 1974 : Injections locales de résines. Celles-ci coûtaient cher, étant approvisionnées par hélicoptères; cependant, la solution adoptée s'est avérée économique compte tenu des difficultés d'accès au site. La tenue des réparations était satisfaisante à l'époque des informations les plus récentes (1979).
- C 3 Percolations à travers le barrage et détérioration du mortier par le CO₂ dissous dans l'eau pure, à faible teneur en sels; de plus, attaque par le gel.
- 1979 : Réalisation d'un masque amont en béton de ciment de laitier, d'une épaisseur minimale de 0,60 m.
- DTp = 5 mg/l
 DP = 0 mg/l
 pH = 6,5.
 Teneur très faible en sels dissous.
- C 4 Les analyses des eaux de la retenue et des fuites ont indiqué une perte équivalant à 0,7 t de CaO par an, due au lessivage par l'eau pure (douce).
- L'étude a révélé des variations saisonnières, mais avec des teneurs moyennes en matières solides dissoutes de 80 mg/l à l'amont et de 100 mg/l à l'aval.
- C 5 Les sulfates dissous dans la fondation rocheuse par l'eau de la retenue sont acheminés dans les galeries principales de drainage. Les canaux de drainage et les surfaces au contact de l'eau étaient atteints sur une profondeur de 200 à 300 mm. Dans les galeries avec aération insuffisante, les gaz sulfureux se sont accumulés et ont attaqué le béton sur une épaisseur de 50 mm.
- On a amélioré la ventilation pour réduire les gaz. Les surfaces atteintes ont été réparées et imperméabilisées au ciment sursulfaté et ensuite revêtues de peinture époxy. Par précaution, les surfaces saines ont été nettoyées au jet air/eau à haute pression et enduites de peinture époxy.
- C 6 La dégradation du béton au pied du barrage, due à l'eau pure, a entraîné des débits de percolation de 3 600 l/min.
- Remise en état des joints principaux et consolidation du barrage par injections de résines époxy.
- C 7 Détérioration du béton sur une épaisseur de 1,2 m par l'action de l'eau douce. Le béton d'origine est de qualité médiocre selon les normes actuelles (ségrégation, compacité insuffisante).
- Un masque en béton armé est prévu pour 1988.
- C 8 Détérioration, par l'eau douce, des parois de l'évacuateur de crue, sur une profondeur d'environ 5 mm, notamment à l'amont des pièces fixes des vannes. Aucune réparation n'est envisagée.
- TSD = 86 mg/l
 DCa = 47 mg/l
 pH = 7,7
 IL = - 1,0
- C 9 Percolations importantes dues à la détérioration du béton du barrage par l'eau douce, à forte teneur en CO₂ dissous, et par le gel.
- 1986 : Réalisation d'un revêtement amont (1,5 mm ép.) en polyéthylène chlorosulfoné (hypalon), armé de fibres de polyester.
- DTp = 30 mg/l
 DP = 3 mg/l
 pH = 6,7.
 Teneur très faible en sels dissous.
- C 10 Percolations importantes dues à la détérioration du béton du barrage par l'eau douce, à forte teneur en CO₂ dissous, et par le gel.
- 1968 : Mise en place d'un masque en tôle pure, de 3 mm d'épaisseur.
- DTp = 4 mg/l
 DP = 4 mg/l

- C 2 The mortar in the dam wall deteriorated badly under the action of high altitude, soft water. Voids several centimetres across were evident in the downstream face and the whole face remained damp. Both the face and joints had deteriorated more towards the base of the dam where reservoir water pressures were highest.
- 1971 : The formation of an upstream curtain in the dam by cement grouting.
- 1974 : Local additional grouting using resins. The resins were expensive and were flown in by helicopter, however, they proved an economic solution given the poor accessibility to the site. Repairs remained effective as at 1979.
- C 3 Seepage through dam body and deterioration of mortar by dissolved CO₂ in pure water, low in salts, also attack by frost.
- 1979 : Construction of a new upstream face with a minimum thickness of 0.6 m and using slag-cement concrete.
- Temp. H = 5 mg/l
Perm. H = 0 mg/l
pH = 6.5
V. low in dissolved salts.
- C 4 Analyses of water in the reservoir and downstream indicated an equivalent loss of 0.7 tonne of CaO per year from the dam body due to leaching by pure (soft) water.
- Analysis showed seasonal variations but with mean TDS upstream of 80 mg/l and 100 mg/l downstream.
- C 5 Reservoir water had dissolved sulphates from the foundation rock, carrying them into the main drainage galleries. Drainage channels and areas in contact with water were affected to depths of 200 to 300 mm. In galleries with inadequate ventilation, sulphurous gases built up and attacked concrete to a depth of 50 mm.
- Ventilation was improved to minimise gas build-up. Attacked surfaces were repaired and sealed with sulfadur cement and then painted with epoxy paint. Unaffected surfaces were washed with compressed air and water and epoxy painted as a precaution.
- C 6 Degradation of concrete at the base of the dam by the action of pure water led to seepage flows of 3 600 litres/minute.
- Epoxy grouting was carried out to restore the main joints and the integrity of the dam wall concrete.
- C 7 Soft water attack has deteriorated concrete to a depth of 1.2 m. The original concrete is judged poor by modern standards with segregation and inadequate compaction.
- A new reinforced concrete face is planned for completion in 1988.
- C 8 Soft water attack to a depth of about 5 mm on spillway, mainly upstream of gate seals. No remedial action.
- TDS = 86 mg/l
Ca.H = 47 mg/l
pH = 7.7
LI = - 1.0
- C 9 Deterioration of dam concrete by soft water, high in dissolved CO₂ and also by frost led to high seepage.
- 1986 : Provision of a 1.5 mm thick upstream face of chlorosulfonate polyethylene reinforced with polyester fibres.
- Temp. H = 30 mg/l
Perm. H = 3 mg/l
pH = 6.7
V. low in dissolved salts.
- C 10 Deterioration of dam concrete by soft water, high in dissolved CO₂, and also by frost led to high seepage.
- 1968 : Provision of a 3 mm thick upstream facing of pure iron plate.
- Temp. H = 4 mg/l
Perm. H = 4 mg/l

pH = 6,8.

Teneur très faible en sels dissous.

- C 11 Attaque acide du béton de la galerie de restitution par H₂S, avec action bactériologique. Aucune indication d'agression par l'eau acide. Détériorations importantes du béton dont la consistance est devenue molle, au-dessus du niveau normal de l'écoulement. Profondeur des détériorations : 30 mm.
Les mesures envisagées portent sur la ventilation pour évacuer l'hydrogène sulfuré, les chasses, la réalisation de nouvelles prises à des cotes élevées, pour exclure l'eau sulfureuse, et la mise en place d'un enduit protecteur.
- C 12 Détérioration de surface sur une profondeur de 5 mm, dont la cause n'est pas précisée (probablement l'eau douce). L'ouvrage remplaçait un barrage plus ancien, construit de 1908 à 1912, qui présentait, en 1972, des détériorations de surface sur une épaisseur de 20 mm.
- C 13 Agression par l'eau acide dans les pertuis et le bassin de dissipation, atteignant une profondeur d'environ 10 mm et mettant à nu les granulats. L'acide provient des écoulements d'une mine de charbon, qui se déversent dans le cours d'eau dont le pH est ainsi porté à 4,0 environ. Aucune réparation n'est prévue.
- C 14 Détérioration superficielle du béton de l'entonnement de l'évacuateur de crue et du bassin de dissipation : béton à 220 kg/m³ de ciment, E/C = 0,6. L'agent agressif n'est pas précisé (peut-être l'eau douce). Seul le béton coulé sur place est atteint, les conduites préfabriquées restant indemnes.
- C 15 Augmentation progressive des fuites par percolation dans les fissures du barrage, provoquées par l'action de l'eau acide agressive.
- D 1 Détérioration superficielle de la matrice du ciment par l'action de l'eau acide.
TSD = 80 à 150 mg/l
Ca = 1 à 5 mg/l
pH = 4,3 à 7,5
- D 2 Désintégration progressive du béton, à fort E/C, due au lessivage par l'eau douce, compromettant la tenue de l'ouvrage et provoquant des dépôts peu esthétiques sur le parement aval.
1924 : Injections dans le corps du barrage.
1925 : Injections dans la fondation, réalisation d'un massif de butée et d'un nouveau parement amont.
1956 : Injections supplémentaires dans le barrage, gunitage de quelques zones du parement aval.
1958 : Gunitage de l'ensemble du parement aval, réfection des nez amont des piles de l'ouvrage de prise. Ces travaux n'ont pas maîtrisé le problème des percolations et, après un certain temps, la gunite s'est décollée sous l'action du gel.
1978 : Campagne de sondages et de contrôles de stabilité.
1985 : Mise en place de tirants de précontrainte ancrés dans la fondation, nouvelles injections dans le barrage, réparations localisées sur le parement amont, réalisation d'un nouveau parement aval en béton armé, ancré au barrage.
- D 3 Percolations d'eau douce le long de reprises de bétonnage dans la partie supérieure de la voûte, laissant des dépôts peu esthétiques sur le parement aval.
Un enduit avec imprégnation chimique, appliqué sur le parement amont, a amélioré la situation, sans être une solution à long terme.
- D 4 Le béton de parement s'est ramolli, prenant la consistance d'un mastic, sur une épaisseur de 300 mm, sous l'action de l'eau douce provenant des hauts plateaux marécageux. Cette eau contenait des particules de tourbe en suspension et présentait une faible teneur en matières solides dissoutes, avec un pH d'environ 5,5 à 6,0.
On a réalisé un masque en béton armé s'étendant depuis la fondation jusque sur la crête du barrage; le masque était ancré dans la fondation et fixé au barrage par tirants en acier inox. Le barrage lui-même a été injecté.
- D 5 L'action conjuguée des sulfates, du lessivage et de la réaction alcali-granulats a réduit la résistance du béton au point de compromettre la stabilité de l'ouvrage. Les dégradations maximales sont apparues dans les zones d'écoulement d'eau et au dessous du niveau de retenue normale.

pH = 6.8
V. low in dissolved salts.

- C 11 Acid attack on concrete by H₂S and sulphur bacteria in the outlet tunnel. Attack by acid water was not indicated. There was extensive deterioration of concrete to a soft consistency, above the normal flow line. Deterioration was to a depth of 30 mm.
Measures being considered include ventilation to remove hydrogen sulphide gas, flushing, constructing new high-level intakes to draw sulphide-free water and the provision of a protective coating.
- C 12 Surface etching to 5 mm depth by undisclosed form of attack, probably soft water. This structure replaced an earlier one constructed 1908-1912 which had surface etching for 20 mm as at 1972.
- C 13 Acid water attack in sluices and stilling basin to a depth of approx 10 mm leaving an exposed aggregate finish. Acid is from coal mine drainage into the river giving a pH = 4.0, approx. No remedial works.
- C 14 Surface etching of 220 kg/m³ and 0.6 w/c ratio concrete in the spillway headworks and stilling basin. Type of attack not disclosed but possibly soft water. Only in situ concrete affected, factory-made pipes have not been affected.
- C 15 Seepage through cracks in the dam progressively increased due to attack by aggressive, acidic water.
- D 1 Surface attack on cement matrix by soft, acidic water.
TDS = 80 to 150 mg/l
Ca = 1 to 5 mg/l
pH = 4.3 to 7.5
- D 2 Leaching of the high w/c ratio concrete by soft water attack progressively disintegrated the concrete, threatening the stability of the structure and causing unsightly face deposits downstream.
1924 : Grouting in the body of the dam
1925 : Foundation grouting, construction of a thrust block and also a new upstream face.

1956 : Further dam grouting and some guniting to downstream face.
1958 : Entire downstream face gunited and intake nosings replaced. The seepage persisted and the gunite was eventually entirely lost by frost action.

1978 : Investigative boring and new stability checks.
1985 : Dam post-tensioned to foundations, dam body re-grouted, local repairs to upstream face and provision of a new reinforced concrete downstream face anchored to the main dam concrete.
- D 3 Soft water percolation through lift joints in upper section of arch led to unsightly deposits on the downstream face.
Chemically impregnated rendering on upstream face temporarily relieved the problem but did not provide a long-term solution.
- D 4 Face concrete softened to the consistency of putty, up to a depth of 300 mm, by the action of soft, high moorland water with suspended peat particles, a low dissolved solids content and pH of about 5.5 to 6.0.
A reinforced concrete facing was provided upstream and extending from the foundations to up over the crest of the dam. The lining was keyed at its base and post-tensioned to the main dam using stainless steel anchors. The interior of the dam was grouted.
- D 5 Sulphate attack, leaching and alkali-aggregate reactivity combined to deteriorate the strength of the dam concrete to an extent which threatened the integrity of the structure through overstressing. The attack was worse in areas of moving water and in the concrete below full supply level.

L'étude de rénovation s'est appuyée sur une campagne de mesures de la vitesse du son dans le béton, avec analyses pétrographiques de carottes. On a décidé de démolir le barrage et de reconstruire un nouvel ouvrage immédiatement à l'aval.

- D 6 Détérioration du parement amont par l'eau douce, découvrant les granulats par endroits.
TSD = 63 mg/l
IL = - 5,5
pH = 5,2
- D 7 Détérioration superficielle par l'eau douce, les granulats étant mis à nu à divers endroits. Percolations le long des joints de construction, en augmentation progressive par suite de la dissolution du ciment.
Campagne d'injections pour réduire les fuites.
DT = 40 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 8,4
- E 1 Mise à nu des granulats sur le parement par l'action de l'eau douce. Signes de dissolution sur la trace des reprises de bétonnage fissurées.
DT = 45 mg/l
Ca = 9 mg/l
pH = 6,9
- E 2 On a constaté deux types d'agression par les sulfates : dissolution de l'hydrate de calcium, produisant du sulfate de calcium et de l'eau, et réaction avec les composés d'alumine, produisant le sulfoaluminate de calcium hydraté occupant un plus grand volume et désintégrant le béton. La formation de l'acide sulfurique résulte de l'action des « thiobactéries sulfo-oxydantes » sur les terres locales pyriteuses, conduisant à des dépôts de limonite et à la formation d'acide sulfurique; le pH de l'eau était ainsi de 3,0 environ. Les dégâts sont localisés dans un puits d'ascenseur dont le béton présente un E/C élevé.
Les travaux ont consisté à enlever le béton atteint, à laver et à sécher au chalumeau à butane les parois et à enduire celles-ci de résines de polyuréthane réchauffées pour accélérer la polymérisation.
- E 3 L'analyse des percolations dans la fondation a indiqué une concentration en sulfates d'environ 300 mg/l. On a choisi un dosage minimal en ciment de 330 kg/m³ (CPA) et un E/C inférieur à 0,5 pour les bétons devant être en contact avec l'eau ou les terres; on n'a plus observé de désordres.
- E 4 Action des sulfures sur un conduit en béton.
1971 : Application d'une peinture époxy.
- E 5 Attaque généralisée, superficielle et interne, due à l'eau douce et provoquant des vides atteignant 300 mm de profondeur sur les lignes de reprise de bétonnage du parement amont. Les analyses de l'eau peuvent être supposées identiques à celles du barrage de Bangala (B 1).
- F 1 Détérioration de la surface du coursier de l'évacuateur principal par l'action conjuguée de l'eau douce et de l'abrasion. L'érosion a atteint 100 mm de profondeur.
IL = - 4,3
pH = 6,0
- F 2 Élimination progressive du liant par lessivage.
Vers le milieu des années 70, application d'une couche de béton projeté sur le parement amont pour réduire la détérioration.
- F 3 Les craintes concernant le contact béton/rocher au droit des murs de l'évacuateur de crue et de la centrale ont nécessité une campagne de carottage pour vérifier s'il y avait risque d'attaque par des sulfates. On a observé la présence d'ettringite, mais aucune détérioration notable. Le béton est de très bonne qualité, le rocher de fondation est un schiste argileux.
- G 1 Pour la réalisation du barrage, le béton fluide et à faible dosage en ciment (200 kg/m³) a été mis en place à la goulotte. Il en est résulté un béton perméable, de qualité médiocre, sensible à l'action de l'eau douce stockée dans la retenue. Peu après la fin de la construction, on exécuta des injections pour remédier à ce défaut.

Extensive sonic pulse velocity measurements were taken and petrographic analysis made of concrete cores. The dam was eventually demolished and a new, replacement dam built immediately downstream.

- D 6 Soft water attack has etched the upstream face exposing aggregate in places.
TDS = 63 mg/l
LI = - 5.5
pH = 5.2
- D 7 Superficial attack by soft water has exposed aggregate in places. Leakage has developed through construction joints and is steadily increasing due to dissolution of cement.
Some grouting carried out to reduce leakage.
Tot. H = 40 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 8.4
- E 1 Soft water attack has exposed aggregates superficially and there is evidence of dissolution on cracked lift lines.
Tot. H = 45 mg/l
Ca = 9 mg/l
pH = 6.9
- E 2 Two forms of sulphuric acid attack have occurred. The first dissolving calcium hydroxide to form calcium sulphate and water, the second reacting with alumina compounds to form calcium hydrate sulphoaluminate, which, by reason of its larger volume, continues the disintegration of the concrete. The sulphuric acid was formed by the action of thiobacteria thiooxidans on local pyritic earth, depositing limonite and releasing sulphuric acid such that the affected water had a pH value of approx 3.0. Attack was concentrated in a lift shaft where a high water/cement ratio concrete had been used.
Attacked concrete was removed and walls washed, then dried with butane gas lamps and coated with polyurethane resins. These in turn were heated to actuate polymerisation.
- E 3 Analyses of foundation seepage water indicated approx 300 mg/l of sulphate. Cement contents of not less than 330 kg/m³ (OPC) and W/C ratios less than 0.5 were used for all concrete in contact with water or soil and no subsequent attack was recorded.
- E 4 Sulphide attack in concrete culvert.
1971 : Application of a water-based, 2-part epoxy paint.
- E 5 Generalised superficial and internal attack due to soft water, leading to holes up to 300 mm deep at lift lines on the upstream face. Water analyses can be assumed as similar to those for Bangala dam (B 1).
- F 1 Damage to the concrete surface of the main spillway chute caused by soft water attack coupled with abrasion. Depths of erosion up to 100 mm.
LI = - 4.3
pH = 6.0
- F 2 Cementitious material has been progressively removed by leaching.
In mid 1970's a layer of shotcrete was applied to the upstream face to alleviate the problem.
- F 3 The foundation contacts of the spillway walls and power station were a cause for concern and were investigated for possible sulphate attack by core drilling. Some ettringite was present though there was no significant deterioration. Concrete was of a very high quality and foundations were shale.
- G 1 The dam was formed using wet chuted concrete with a low (200 kg/m³) cement content. This produced poor quality, porous concrete particularly susceptible to attack by the soft reservoir water. Remedial grouting to counter-act leaking was carried out soon after the dam was built.

- 1966 : Injections importantes dans le corps du barrage et réalisation d'un voile d'injection immédiatement à l'aval du parement amont. Coulis utilisés : ciment, silicate, résines.
- G 2 Fuites dans le barrage, notamment dans les fissures, avec lessivage du ciment par l'eau douce, d'origine glaciaire, stockée dans la retenue.
1960-1969 : Imperméabilisation de tout le parement amont à l'aide d'une membrane d'élastomère chlorosulfoné.
Depuis 1969 : Réparations périodiques au polyuréthane.
- G 3 Détérioration de la chaussée de route, due aux produits chimiques et sels de déneigement.
Élimination de la surface atteinte et remplacement par du béton d'époxy. Imperméabilisation de la nouvelle chaussée pour réduire le risque à l'avenir.
- G 4 Formation de trous atteignant 40 mm de profondeur et détérioration des granulats, dans un conduit en béton coulé *in situ*. L'origine des dommages est supposée être l'action de l'eau acide.
- G 5 Percolations dans le barrage, avec mise à nu et corrosion d'armatures, résultant de l'action de l'eau douce.
1972 : Application, sur le parement amont, d'une couche de 2 mm d'épaisseur de mortier bitumineux à la résine époxy, armé de fibres de verre. Réduction des fuites de 60 %.
DTp = 25 mg/l
DP = 7 mg/l
pH = 7,2.
Teneur très faible en sels dissous.
- G 6 Percolation d'eau douce et tourbeuse de la retenue à travers le barrage, construit en béton de qualité médiocre par rapport aux normes modernes. Il en est résulté des dépôts peu esthétiques sur le parement aval et une perte progressive du ciment du barrage.
1930 : Injections sous pression dans le corps du barrage; réussite temporaire.
1944 : Étanchement du parement amont avec de la gunite. Cette couche a été détruite après quelques années.
1955 : Campagne de carottage.
1958 : Nettoyage du parement amont. Application de 5 couches de bitume armé de fibres de verre, maintenues en place et protégées par une dalle en béton armé (ép. 0,6 à 1 m), ancrée au barrage. A l'aval, construction d'un remblai de butée en terre.
- H 1 Détérioration superficielle peu importante du parement amont par l'eau douce.
DT = 20 mg/l
pH = 6,7
- H 2 Agression par l'eau douce nécessitant des travaux importants. Ceux-ci sont identiques aux travaux exécutés au barrage de Gyfynys (Grande-Bretagne) mais sans les injections de 1930 (G 6).
- H 3 Conduit, à l'amont des vannes de garde, attaqué par l'acide sulfurique sur une épaisseur de 3 mm. L'origine de l'acide est l'hydrogène sulfuré produit par la décomposition de la végétation et des terres organiques laissées en place lors du déboisement de la retenue.
- J 1 Selon les calculs, le lessivage du béton du barrage par l'eau douce entraîne une perte de ciment équivalant à 10 t de CaO par an. Les percolations ont diminué progressivement car les drains se colmatent, mais il en résulte une augmentation des sous-pressions.
- J 2 Détérioration superficielle sur une épaisseur de 5 mm, dont l'origine n'est pas précisée (probablement l'eau douce). Cet ouvrage remplace un ouvrage plus ancien construit de 1908 à 1912, où le même type de dégâts atteignait une profondeur de 20 mm en 1972.
- J 3 L'hydrogène sulfuré accumulé dans les galeries a attaqué les parois de béton, par suite de formation d'acide. Les surfaces ont pris une consistance pâteuse.
Mise en place de ventilateurs.
- K 1 Sur l'évacuateur de surface, mise à nu des gros granulats; l'agent incriminé est l'eau agressive (douce).

- 1966 : Extensive remedial grouting in the main body of the dam and the formation of a grouted curtain immediately adjacent to the upstream face, using cement, silicate and resins.
- G 2 Leakage through the main dam wall, particularly at fissures with leaching of cement due to the action of the soft, glacial, reservoir water.
1960-1969 : Sealing of entire upstream face using an elastomeric chlorosulphonate membrane.
1969 on : Periodic repairs using polyurethane.
- G 3 Deterioration of roadway surface by de-icing chemicals and salts.
Deteriorated surfaces removed and replaced with epoxy-bonded concrete. Roadway surface then sealed to reduce risk of further damage.
- G 4 Pitting up to 40 mm deep with aggregate deterioration due to suspected acid water attack in an in situ concrete conduit.
- G 5 Seepage through main body of dam with some local exposure and corrosion of reinforcement, due to soft water attack.
1972 : Coating of upstream face with a 2 mm thick layer of bituminous, epoxy resin mortar reinforced with glass fibre. Seepage was reduced by 60 %.
Temp. H = 25 mg/l
Perm. H = 7 mg/l
pH = 7.2
V. low in dissolved salts.
- G 6 Seepage of soft, peaty reservoir water through the main body of the dam, constructed using poor concrete, by modern standards. This led to unsightly deposits on the downstream face and progressive loss of cement.
1930 : Pressure grouting in main dam body temporarily successful.
1944 : Upstream face sealed with gunite. This failed within a few years.
1955 : Investigative core drilling.
1958 : Upstream face cleaned and 5 layers of bitumen and glass fibre applied. This in turn was retained and protected by a 0.6 to 1.0 m thick reinforced concrete slab upstream anchored back to the main dam body. Downstream, the dam was buttressed by the construction of an earth embankment.
- H 1 Minor surface etching of upstream face due to soft water attack.
Tot. H = 20 mg/l
pH = 6.7.
- H 2 Soft water attack and extensive remedial work. All details as for Gyfynys dam but without any pressure grouting in 1930 (G 6).
- H 3 Conduit upstream of emergency gates affected for a depth of 3 mm by sulphuric acid attack. This in turn caused by sulphide gas from decomposition of vegetation and organic soils left during initial site clearance.
- J 1 Soft water leaching of the main dam concrete is estimated to be removing cement at the equivalent rate of 10 tonnes of CaO per year. Seepage has gradually decreased as deposits block drains but this in turn has led to increased uplift.
- J 2 Surface etching to 5 mm depth by undisclosed form of attack; probably soft water. This structure replaced an earlier one constructed 1908-1912 which had surface etching to 20 mm as at 1972.
- J 3 Hydrogen Sulphide built up in galleries has attacked concrete surfaces, via acid formation, reducing them to a paste-like consistency.
Ventilation fans have been installed.
- K 1 Coarse aggregate exposed on overspill due to suspected aggressive (soft) water attack.

- IL = - 5,1
pH = 5,2
- K 2** Application d'une couche de résine époxy sur le béton de l'évacuateur de crue et de l'ouvrage de prise d'eau pour résister à l'agression « chimique » et à l'abrasion.
- K 3** Attaque par l'eau douce atteignant une profondeur de 10 mm et mettant à nu les gros granulats.
DT = 25 à 55 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 8
- L 1** Lessivage du liant par l'eau douce (fonte des neiges) sur les trois barrages de l'aménagement. En 1970, le béton du barrage principal (n° 1) était gravement atteint sur une épaisseur de 100 mm, et partiellement détérioré sur une épaisseur de 0,6 m.
1919 : Gunitage du parement amont du barrage n° 3.
1938 : Gunitage du parement amont du barrage n° 1. Reprise du gunitage au barrage n° 3.
1939 : Réfection, avec du béton, du parement du barrage n° 2 modifié pour permettre l'évacuation des crues.
1963 : Réfection du parement du barrage n° 3, un nouveau béton étant appliqué sur la gunité restée en place.
1974 : Au barrage n° 1, réalisation d'un nouveau parement amont en béton (ép. 0,3 m). Au barrage n° 3, mise en place de remblai à l'amont et à l'aval pour améliorer la stabilité.
Retenue : CaCO₃ = 155 mg/l pH = 6,5 à 8,5
Percolation en galerie : CaCO₃ = 2 900 mg/l pH = 7,7 à 11,0
- L 2** Détérioration du béton des pertuis et du bassin de dissipation, sur une épaisseur atteignant 10 mm, par l'eau acide provenant d'une mine de charbon.
pH = 2,9 en 1952
pH = 4,9 en 1970
pH = 6,5 en 1980
- M 1** Percolation d'eau douce et tourbeuse de la retenue à travers le barrage, dont le béton est de qualité médiocre selon les normes actuelles. Il en est résulté des dépôts peu esthétiques sur le parement aval et la perte progressive du ciment du béton.
1938 : Injections depuis l'aval, sans succès.
1944 : Étanchement du parement amont avec de la gunité qui s'est vite détériorée.
1946 : Campagne de carottage.
1947 : Réparations de la gunité détériorée à l'aide de feutre imprégné de bitume, et de bandes d'étanchéité comprimées, sans succès.
1955 : Campagne de carottage.
1958 : Nettoyage du parement amont et application de 5 couches de bitume armé de fibres de verre, maintenues en place et protégées par une dalle amont en béton armé (ép. 0,6 à 1,0 m) ancrée au barrage. Réfection du parement aval avec du nouveau béton. Les percolations ont continué mais à un débit très réduit.
1987 : Décision prise de remplacer le barrage par un barrage-poids situé immédiatement à l'aval.
- M 2** Détérioration superficielle due à l'eau douce, avec mise à nu localement des granulats.
DT = 10 à 40 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 7,0
- M 3** Détérioration progressive du barrage due à l'action de l'eau douce de la retenue (fonte des neiges). Accélération du lessivage dans les zones à forts débits de percolation, sensibilité du béton humide à l'action du gel-dégel. Écaillage sur le parement aval mettant à nu les armatures.
1952 : Confortement et injection du barrage, sans grand succès.
1961 : Étanchement réussi du parement amont incliné (1/0,8), avec du bitume.

- LI = - 5.1
pH = 5.2
- K 2 Epoxy resin facing applied to resist " chemical " and abrasion attack to concrete in spillway and intake.
- K 3 Soft water attack on concrete to depths of up to 10 mm, exposing coarse aggregate.
Tot. H = 25 to 55 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 8
- L 1 Leaching of cement paste by soft (snowmelt) water at all three dams on this scheme. In 1970 the main dam (No. 1) concrete had severely deteriorated to a depth of 100 mm and partially deteriorated to depths up to 0.6 m.
1919 : Dam 3 gunited on upstream face.
1938 : Dam 1 gunited on upstream face. Dam 3 re-gunited.
1939 : Dam 2 re-surfaced with new concrete and modified to act as a spillway.

1963 : Dam 3 re-surfaced with new concrete over previous gunite.

1974 : Dam 1 provided with a new 0.3 m thick upstream concrete face. Dam 3 buttressed by embankments upstream and downstream to enhance stability.
Reservoir Ca CO₃ = 155 mg/l
pH = 6.5 to 8.5
Gallery Seepage Ca CO₃ = 2 900 mg/l
pH = 7.7 to 11.0
- L 2 Acid water attack from coal mine drainage has etched concrete in sluices and stilling basin to depths up to 10 mm.
pH = 2.9 in 1952, 4.9 in 1970 and 6.5 in 1980.
- M 1 Seepage of soft peaty reservoir water through the main body of the dam, constructed using poor concrete by modern day standards. This led to unsightly deposits on the downstream face and progressive loss of cement.
1938 : Unsuccessful pressure grouting from downstream.
1944 : Upstream face sealed with gunite which rapidly deteriorated.
1946 : Investigative core drilling.
1947 : Unsuccessful attempts to patch up gunite with bituminous felt and compression sealing strip.
1955 : Investigative core drilling.
1958 : Upstream face cleaned and 5 layers of bitumen and glass fibre applied. This in turn was retained and protected by a 0.6 to 1.0 m thick reinforced concrete slab upstream anchored back to the main dam body. The downstream face of the dam was also re-surfaced with new concrete. Seepage continued though at a much-reduced rate.
1987 : Decision taken to replace the dam with a new gravity dam, immediately downstream.
- M 2 Superficial attack by soft water with localised aggregate exposure.
Tot. H = 10 to 40 mg/l
Ca = 6 mg/l
pH = 7.0
- M 3 Progressive deterioration of the main dam wall by the action of soft (snowmelt) reservoir water. Leaching accelerated in areas of high seepage and the moist concrete became particularly prone to additional freeze-thaw damage. Spalling on the downstream face exposed reinforcement.
1952 : Main wall reinforced and grouted without particular success.
1961 : Sloping (1 in 0.8) upstream face waterproofed successfully using asphalt.

- M 4 Agression en galeries par les sulfates et le gaz sulfureux. Les détails sont identiques à ceux donnés pour le barrage de Caspe (C 5).
- M 5 Agression par l'eau acide, par suite d'écoulements acides provenant d'une mine de charbon et atteignant le cours d'eau. Détériorations très importantes du béton sur une épaisseur de 0,6 à 2,0 m. Béton projeté en 1935, 1940, 1952, 1954 et 1957.
Réfections importantes : élimination du béton endommagé et son remplacement par du béton armé ou par du béton projeté, entre 1974 et 1980.
- M 6 Agression par l'eau acide, par suite d'écoulements acides provenant d'une mine de charbon et atteignant le cours d'eau. Détériorations très importantes du béton sur une épaisseur de 100 à 150 mm.
1951 : Béton projeté appliqué sur les murs de l'écluse.
1967 : Reconstruction et surélévation du barrage.
- M 7 Agression par l'eau acide, par suite d'écoulements acides provenant d'une mine de charbon et atteignant le cours d'eau. Détériorations très importantes du béton sur une épaisseur de 150 à 200 mm.
1940 : Béton projeté appliqué sur les murs de l'écluse.
1958 : Nouvelle application de béton projeté dans certaines zones.
- M 8 Agression par l'eau acide, par suite d'écoulements acides provenant d'une mine de charbon et atteignant le cours d'eau. Détériorations très importantes du béton sur une épaisseur de 200 mm.
1956 : Réparations avec du béton projeté.
1959 : Reconstruction et surélévation du barrage.
1983 : Nouvelle application de béton projeté sur le guideau supérieur.
- M 9 Les bactéries dans les drains inférieurs de fondation produisent du H₂S qui, au contact de l'eau de percolation, donne de l'acide sulfurique. Celui-ci a attaqué le béton de la galerie sur une épaisseur de 25 mm.
Travaux : élimination du béton atteint, nettoyage et réparation de ces zones avec du coulis résistant aux sulfures.
Une meilleure ventilation et des chasses ont été recommandées.
- N 1 Fuites importantes, notamment aux joints de construction, par suite du lessivage progressif du béton au contact de l'eau douce. Érosions importantes sur le parement aval.
1963 : Nettoyage du parement amont, suivi de la réparation des zones endommagées, afin de réaliser un support uni. Sur ce support, application d'une couche d'impression et exécution d'une nouvelle surface à l'aide de fibres de verre et de 4 couches de polyester.
- N 2 Sur le mur-guideau du seuil déversant, détérioration du béton sur une épaisseur de 100 mm, due probablement à l'action de l'eau douce et à l'abrasion par les sédiments.
1976 : Réparations locales au mortier.
1986 : Réparations locales à l'époxy (en projet).
TSD = 50 mg/l
DT = 30 mg/l
Ca = 8 mg/l
pH = 7,7
(ces valeurs sont valables en général, mais peuvent varier selon le mois ou l'année).
- O 1 Détérioration importante du béton, sur une épaisseur d'environ 150 mm, sur l'ouvrage de prise, l'évacuateur de crue et le bassin de dissipation, due à l'action d'acide dilué, probablement associée à l'action du gel-dégel.
1975 : Réfection des parois de la prise d'eau et de l'évacuateur de crue; modification du système de traitement des effluents dans une usine d'exploitation de cuivre responsable de la pollution.
pH = 5,0 (1945) et 6,9 (1983).
SO₄ = 40 mg/l (sans variation sur cette période).

- M 4 Sulphate and sulphurous gas attack in galleries. All details as for Caspe Dam (C 5).
- M 5 Acid water attack from acid coal mine drainage water discharging into river. Severe deterioration in the outer 0.6 to 2.0 m of concrete.
Shotcreting in 1935, 1940, 1952, 1954 and 1957. Major reconstruction with removal of damaged concrete and replacement with reinforced structural concrete or shotcrete from 1974 to 1980.
- M 6 Acid water attack from acid coal mine drainage water discharging into river. Severe deterioration in the outer 100 to 150 mm of concrete.
1951 : Lock chamber walls shotcreted
1967 : Dam reconstructed and raised.
- M 7 Acid water attack from acid coal mine drainage water discharging into river. Severe deterioration in the outer 150 to 200 mm of concrete.
1940 : Lock chamber walls shotcreted
1958 : Selected areas re-shotcreted
- M 8 Acid water attack from acid coal mine drainage water discharging into river. Severe deterioration in the outer 150 to 200 mm of concrete.
1956 : Shotcrete repairs
1959 : Dam reconstructed and raised
1983 : Upper guide wall re-shotcreted
- M 9 Sulphate bacteria in the lower foundation drains released H₂S which combined with drainage water to form sulphuric acid. This attacked concrete surfaces in the gallery to a depth of 25 mm.
Deteriorated concrete was removed, surfaces cleaned and patched with sulphide — resistant grout. Improved ventilation and flushing recommended.
- N 1 Substantial leaking, particularly at construction joints, due to soft water attack progressively leaching the concrete. Substantial erosion occurred on the downstream face.
1963 : Upstream face cleaned and patched to provide a smooth base, then primed and completely re-surfaced using fibreglass and 4 layers of polyester.
- N 2 Deterioration to a depth of 100 mm over part of the ogee crest wingwall, due probably to soft water attack combined with sediment abrasion.
1976 : Mortar patching
1986 : Epoxy patching planned
TDS = 50 mg/l
Tot. H = 30 mg/l
Ca = 8 mg/l
pH = 7.7
(all values typical and subject to annual and monthly variations).
- O 1 Significant concrete deterioration to depths of about 150 mm on the intake, spillway and stilling basin, due to weak acid attack, probably combined with freeze-thaw action.
1975 : Intake and spillway concrete re-surfaced and a local copper company (responsible for pollutants), made changes to their industrial waste treatment.
pH = 5.0 (1945) and 6.9 (1983).
SO₄ = Constant throughout at 40 mg/l.

- O 2 Agression par l'eau douce et mise à nu des gros granulats sur le parement amont; également signes de détérioration du rideau d'injection.

DT = 20 mg/l pH = 7,0
Ca = 4 mg/l CO₂ libre = 8 mg/l

- O 3 Détérioration superficielle des bajoyers de l'ouvrage de restitution par l'action de l'eau douce.
- O 4 Lessivage du béton du barrage par l'eau agressive, riche en CO₂ dissous, provoquant des dépôts d'oxyde de fer hydraté et de calcium sur le parement aval. Corrosion de quelques armatures. Réparations à l'étude en 1986.

- O 5 Lessivage plus ou moins important de tous les bétons en contact avec l'eau douce, agressive de la retenue. Détérioration des joints de l'ouvrage de prise sur une épaisseur de 5 mm en général, mais pouvant aller par endroits jusqu'à plus de 50 mm. Dans les zones de béton poreux, de qualité médiocre, toute la matrice du ciment a disparu.

Quelques essais décevants à l'époxy dilué dans l'eau. Des travaux importants de réparation sont actuellement à l'étude (1986).

TSD = 7 mg/l
DT = 2,5 mg/l
Ca = 0,7 mg/l
pH = 7,6

- P 1 Détérioration progressive du béton du barrage résultant du lessivage du ciment par l'eau douce de la retenue. Fuites excessives.

Réparation du parement amont au moyen d'une gunite, de 50 mm d'épaisseur, et du parement aval au moyen d'une dalle en béton, de 0,6 m d'épaisseur. Injections au coulis de ciment et de cendres volantes.

- P 2 Détérioration du béton dans l'ouvrage de prise par attaque acide. L'acide provient du H₂S transformé par les bactéries, ce gaz provenant, à l'origine, de la décomposition des matières végétales et animales présentes dans la retenue. La turbulence provoquée par le débit entrant dans la galerie entraîne un dégagement de H₂S et le processus de détérioration peut commencer. Les parois de la galerie ont été atteintes sur une épaisseur allant jusqu'à 40 mm.

Dans la construction de l'ouvrage, on utilisa le ciment type I. Des essais exécutés en 1979 ont indiqué l'absence de H₂S dissous dans les 20 m supérieurs de la retenue. Par contre, au-dessous, la concentration en H₂S était supérieure à 3,0 mg/l. La teneur en sulfates varie de 400 à 800 mg/l.

- P 3 Dissolution suspectée du rideau d'injection et quelques détériorations superficielles, très peu importantes, du béton de la voûte. L'origine de ces phénomènes est l'eau douce.

Retenue	Drains
DT = 50 à 70 mg/l	200 à 360 mg/l
Ca = 10 à 16 mg/l	40 à 130 mg/l
Na = 13 à 19 mg/l	48 à 106 mg/l
K = 2,4 à 3,0 mg/l	20 à 26 mg/l
pH = 7,3 à 8,0	11,8 à 12,0

Pour les autres ions, la teneur est quasi constante.

- P 4 Les écoulements de la chaussée, chargés en sel de déneigement (NaCl), s'évacuaient directement dans une partie de l'évacuateur de crue revêtu de béton. La détérioration du béton a atteint une profondeur de 25 mm en moyenne, et jusqu'à 125 mm localement.

Certaines parties de l'évacuateur avaient été recouvertes de terre végétale et ensemencées; les écoulements seront dérivés vers ces zones.

- R 1 Fuites importantes à travers et sous le barrage; parement amont détérioré par endroits sur une épaisseur de 150 mm, d'autres zones détériorées ayant été détectées vers la fin des années 70. Le même type de dégâts était visible sur l'ouvrage de prise et le canal d'aménée.

L'eau de la retenue est fortement polluée par les effluents domestiques et industriels et présente une forte teneur élevée en sulfates, en nitrates et en CO₂ dissous. Les travaux de réparation définis en 1985 comportaient des injections dans la fondation, la réfection du parement amont du barrage

- O 2 Soft water attack on upstream face with coarse aggregate exposed, also suspected deterioration of grout curtain.
- | | | | |
|--------|-----------|----------------------|----------|
| Tot. H | = 20 mg/l | pH | = 7.0 |
| Ca | = 4 mg/l | Free CO ₂ | = 8 mg/l |
- O 3 Surface etching of tailrace walls by soft water attack.
- O 4 Attack by soft water rich in dissolved CO₂ has leached main dam wall concrete producing hydrated iron oxide and calcium deposits on the downstream face. Some corrosion of reinforcement has also occurred.
Remedial steps are under review as at 1986.
- O 5 All concrete in contact with the aggressive, soft reservoir water has been affected to some extent by leaching. Depths of attack are generally 5 mm but 50 mm or more at intake joints. In areas of poor, honeycombed concrete all the cement matrix has been removed.
Some unsuccessful trials were carried out with water-dispersible epoxy. Widespread remedial work in under consideration as at 1986.
- | | |
|--------|------------|
| TDS | = 7 mg/l |
| Tot. H | = 2.5 mg/l |
| Ca | = 0.7 mg/l |
| pH | = 7.6 |
- P 1 Soft reservoir water progressively deteriorated the main dam wall concrete by leaching cement, leading to excessive seepage.
The upstream face was re-surfaced with a 50 mm thick layer of gunite and the downstream face with a 0.6 m concrete slab. Remedial grouting was also carried out using cement and fly-ash.
- P 2 Corrosion of concrete within the inlet structure through acid attack. The acid is a by product of H₂S acted on by bacteria, the H₂S in turn originating from decomposing plant and animal matter in the reservoir. As water enters the tunnel the turbulence causes H₂S to be released into the tunnel air allowing the corrosion process to begin. Tunnel walls have been affected to depths of 40 mm.
Type I cement was used during construction. Tests in 1979 detected no dissolved H₂S in the top 20 m of reservoir water. Below 20 m, however, concentrations of H₂S exceeded 3.0 mg/l. Sulphate concentrations vary from 400 to 800 mg/l.
- P 3 Suspected dissolution of grout curtain and some very minor surface etching of the main arch concrete, all due to soft water attack.
- | | |
|--------|--|
| Tot. H | = 50 to 70 mg/l (reservoir) and 200 to 360 mg/l (drains) |
| Ca | = 10 to 16 mg/l (reservoir) and 40 to 130 mg/l (drains) |
| Na | = 13 to 19 mg/l (reservoir) and 48 to 106 mg/l (drains) |
| K | = 2.4 to 3.0 mg/l (reservoir) and 20 to 26 mg/l (drains) |
| pH | = 7.3 to 8.0 (reservoir) and 11.8 to 12.0 (drains). |
- Other ions more or less constant.
- P 4 Road drainage containing NaCl de-icing salts discharged directly onto a portion of concrete-lined spillway. This deteriorated the concrete surface to a depth of 25 mm on average but up to 125 mm in places.
Selected parts of the spillway have been soiled and seeded. Drainage flows will be diverted to those areas.
- R 1 Substantial seepage both through and beneath the dam and areas of upstream face deteriorated to a depth of 150 mm and more were revealed in the late 1970's. Similar attack was evident on the intake structure and headrace channel.
The reservoir water is heavily polluted by domestic and industrial waste and contains high amounts of sulphates, nitrates and dissolved CO₂. Remedial works envisaged as at 1985 comprised

au moyen de béton projeté, et la mise en place de tirants de précontrainte dans le barrage, ancrés dans la fondation rocheuse.

- R 2 Attaque sélective, par l'eau douce, des gros granulats carbonatés dans les murs et le radier d'un canal de restitution qui fonctionne souvent. La fraction fine siliceuse des granulats est restée en place, en relief. Les surfaces atteintes furent nettoyées par sablage et enduites de coulis à l'époxy.

TSD = 116 mg/l
DT = 68 mg/l
pH = 7,5
Ca = 17,5 mg/l
IL = - 0,7 à - 1,1

- R 3 Attaque en galerie par les sulfates et le gaz sulfureux. Les détails sont identiques à ceux donnés pour le barrage de Caspe (C 5).

- R 4 Percolations à travers le barrage, qui a été détérioré par l'action de l'eau douce (lessivage) et du gel-dégel.

1976 : Parement amont enduit de résines époxy armées de fibres de verre.

DTp = 12 mg/l
DP = 7 mg/l
pH = 8,5

Teneur très faible en sels dissous.

- R 5 Le lessivage par l'eau douce a provoqué des détériorations du barrage telles que le débit de percolation, mesuré en 1929, était de 35 000 l/min.

1928 : Essai, sans succès, d'injection du barrage. Réalisation d'un masque mince, en béton armé, à 2 m devant le parement amont, et reposant sur un réseau d'étrésillons en béton. Un réseau de drainage fut mis en place entre le masque et le barrage.

TSD = 7 mg/l
pH = 5,9

- R 6 Action de l'eau douce sur le barrage et le déversoir, les gros granulats étant mis à nu par endroits.

- R 7 Détérioration superficielle du béton de l'évacuateur, les gros granulats étant mis à nu par endroits.

TSD = 31 mg/l
Ca = 1 mg/l
pH = 6,1
IL = - 4,6

- S 1 Percolations importantes par suite de la détérioration du béton du masque Lévy, résultant de l'action de l'eau très pure provenant d'un lac glaciaire de haute montagne. Débit de fuites mesuré : 1 020 l/min.

1958 à 1960 : Enlèvement de l'ancien masque, exécution d'injections dans le barrage et sa fondation, réalisation d'un masque en béton, d'une épaisseur de 1,5 à 4,0 m, ancré au barrage et comportant un réseau complet de drains de décharge et de galeries d'évacuation. Le débit de fuites a été réduit à 10,8 l/min.

- S 2 Des analyses nombreuses ont mis en évidence le lessivage du béton du barrage par l'eau très pure (douce) de la retenue.

	Retenue	Aval
TSD	= 100 mg/l	400 mg/l
DT	= 100 mg/l	170 mg/l
SO ₄	= 40 mg/l	15 mg/l
Alcalis	= 5 mg/l	45 mg/l
Silice	= 2 mg/l	11 mg/l
pH	= 7,5	12

Ces valeurs sont des moyennes, les valeurs mensuelles étant très variables.

- S 3 Détérioration peu importante de la partie supérieure de la crête du barrage (1,5 m supérieurs), attribuée en partie à l'action des sulfates.

foundation grouting, shotcreting the upstream face of the dam and post-tensioning the dam down into the foundation rock.

- R 2 Soft water selectively attacked the carbonate, coarse aggregates in the walls and floor of a regularly used outlet chute. Siliceous fine aggregate was left standing in relief. Affected surfaces were sandblasted and coated with epoxy grout.

TDS = 116 mg/l
Tot. H = 68 mg/l
pH = 7.5
Ca = 17.5 mg/l
LI = - 0.7 to - 1.1

- R 3 Sulphate and sulphurous gas attack in galleries. All details as for Caspe Dam (C 5).

- R 4 Seepage through body of dam which had deteriorated due to leaching by soft water and surface freeze-thaw action.

1976 : Upstream face coated with epoxy resin incorporating glass fibre

Temp. H = 12 mg/l
Perm. H = 7 mg/l
pH = 8.5
V. low in dissolved salts

- R 5 Soft water leaching deteriorated the body of the dam to such an extent that seepage losses of 35 000 l/min were recorded in 1929.

1928 : Unsuccessful grouting over a trial section was followed by the construction of a thin, independent, reinforced concrete facing wall 2 m upstream of the main dam and supported off it by a system of concrete props. The space between the slabs and dam was provided with drains.

TDS = 7 mg/l
pH = 5.9

- R 6 Soft water attack on the dam wall and overspill has exposed coarse aggregate in places.

- R 7 Surface etching of spillway concrete has exposed aggregate in places.

TDS = 31 mg/l
Ca = 1 mg/l
pH = 6.1
LI = - 4.6

- S 1 High seepages resulting from concrete deterioration of Levy-type facings due to the action of very pure, high altitude, glacial lakı water. Seepage rates of 1 020 l/min were recorded.

1958 to 1960 : Old facing removed and extensive grouting of dam and foundation carried out, followed by the construction of a new concrete face, varying in thickness from 1.5 to 4.0 m, anchored to the main dam and provided with an extensive network of relief drains and collector galleries. Seepage rates were reduced to 10.8 l/min.

- S 2 Extensive analyses showed that the dam concrete was deteriorated by leaching due to the action of very pure (soft) reservoir water.

TDS = 100 mg/l (reservoir) and 400 mg/l (downstream).
Tot. H = 100 mg/l (reservoir) and 170 mg/l (downstream)
SO₄ = 40 mg/l (reservoir) and 15 mg/l (downstream)
Alkalis = 5 mg/l (reservoir) and 45 mg/l (downstream)
Silica = 2 mg/l (reservoir) and 11 mg/l (downstream)
pH = 7.5 (reservoir) and 12 (downstream)

Values given are mean values and are subject to considerable monthly variation.

- S 3 Minor deterioration of the top 1.5 m of the dam crest believed to be partly attributable to sulphate attack.

Some sand blasting and application of a sealant. Long-term remedial measures under review (as at 1986).

Sablage, application d'un produit d'étanchéité. La solution de réparation définitive est actuellement (1986) à l'étude.

DT = 180 mg/l
SO₄ = 70 à 140 mg/l

- S 4 Détérioration superficielle par l'action de l'eau douce. Les algues qui ont poussé sur le béton protègent celui-ci.

DT = 15 mg/l
Ca = 2 mg/l
pH = 6,8
CO₂ libre = 4 mg/l

- S 5 Action de l'eau acide sur le parement amont du barrage.
1981 : Application d'un enduit à la résine époxy acrylique.

- S 6 Détérioration superficielle du béton, notamment aux joints de reprise de l'ouvrage, par l'action de l'eau douce.

- S 7 Lessivage du mortier par l'eau contenant du CO₂ dissous.

Procédé de réparation actuellement à l'étude (1986) :

DTp = 3 mg/l
DP = 38 mg/l
pH = 7,5
CO₂ libre = 2 mg/l

- S 8 Craintes de détérioration du béton de l'évacuateur de crue par l'action de la pyrrhotine contenue dans des lentilles de schiste de la fondation. Pour cette raison, la zone de l'évacuateur a été injectée, sur une profondeur de 5 m, avec un coulis de ciment de type V (80 %) et de pouzzolanes (20 %). Le même dosage a été adopté pour le béton armé du revêtement.

- S 9 Pour la construction de la centrale souterraine, utilisation généralisée du ciment de type V résistant aux sulfates. Cependant, le taux de SO₃ observé dans les eaux de percolation n'était que de 84 mg/l, par suite de la présence de pyrrhotine. Néanmoins, le béton projeté du revêtement de la voûte de l'usine, contenant du ciment de type III, a été attaqué par les sulfates après 5 ans.

- S 10 Dans certaines parties des voûtes anciennes, l'insuffisance des armatures verticales a permis la fissuration du béton et, ensuite, son lessivage par l'eau très pure et agressive de la retenue.

Les réparations au moyen de gunite se sont avérées insuffisantes. La solution d'un revêtement en bitume, protégé par une dalle amont en béton armé (une voûte seulement revêtue entièrement), a été efficace mais onéreuse.

Ultérieurement, on a essayé trois solutions basées sur les résines : époxy + fibres de verre; néoprène; époxy + néoprène. La première a été la plus efficace, le néoprène seul étant déchiré par la glace.

En 1972, ce barrage a été noyé dans la retenue du nouveau barrage en terre de Suorva, construit à l'aval. Actuellement (1986), on examine les injections dans la fondation de ce nouveau barrage pour déceler des signes éventuels d'agression par les sulfates.

- T 1 A une distance d'environ 20 km à l'amont du barrage se trouvent des sources d'eau chaude, connues pour leur acidité. Leur neutralisation est prévue dans le cadre de la construction du barrage, l'eau passant à travers des trémies chargées de calcaire broyé.

- T 2 Attaque par les acides dans la galerie de restitution, l'origine étant le H₂S et les bactéries sulfureuses. Les détails sont identiques à ceux donnés pour le barrage de Clendening (C 11).

- T 3 Lessivage de la pâte de ciment par l'eau douce. Les zones atteintes sont, notamment, les parements amont et aval, en particulier aux joints de construction. Épaisseur atteinte : 10 mm en moyenne, jusqu'à 150 mm aux joints de construction.

1984 : Réparations locales à l'aide d'un produit spécial commercialisé (mortier avec imprégnation chimique). Calfeutrage des joints amont.

- T 4 Lessivage superficiel du béton par l'eau douce dans une galerie d'alimentation en eau (diamètre = 3,5 et 4,5 m; longueur = 34 km).

Tot. H = 180 mg/l
SO₄ = 70 to 140 mg/l

- S 4 Superficial attack by soft water. The concrete has become protected by algae growth.

Tot. H = 15 mg/l
Ca = 2 mg/l
pH = 6.8
Free CO₂ = 4 mg/l

- S 5 Acidic water attack on upstream face of dam.
1981 : Application of a vinyl ester resin coating system.

- S 6 Surface etching of concrete, especially at lift joints, due to the action of soft water.

- S 7 Leaching of mortar by soft water with dissolved CO₂.
Remedial steps under study as at 1986.

Temp. H = 3 mg/l
Perm. H = 38 mg/l
pH = 7.5
Free CO₂ = 2 mg/l

- S 8 The spillway was considered to be prone to attack from pyrrhotite contained in lenses of foundation schist. The area around the spillway was therefore grouted to a depth of 5 m with 80 % type V cement and 20 % pozzolan. A reinforced concrete lining adopted the same proportions.

- S 9 The construction of the underground power station used type V cement for general concrete, to resist sulphate attack. In fact SO₃ contents of only 84 mg/l were found in seepage water, these due to the presence of pyrrhotite. Nevertheless a type III cement shotcrete roof lining was attacked by sulphate action within 5 years.

- S 10 Insufficient vertical reinforcement in parts of the older arches led to the formation of fissures and then to leaching by the very pure, aggressive reservoir water.

An early gunite repair proved unsatisfactory. A subsequent facing of bitumen protected by an upstream reinforced concrete slab (all over one arch only) proved successful but expensive.

Trials were subsequently carried out using 3 resin systems, epoxy and glass fibre, neoprene and a combination of epoxy and neoprene. The pure epoxy repairs were the most successful and the pure neoprene repairs the least successful, due to tearing by ice.

In 1972 this dam was inundated by the reservoir of a new Suorva (earth) dam built downstream. As at 1986 the foundation grouting of the new dam was being investigated for possible sulphate attack.

- T 1 About 20 km upstream of the dam are hot springs, famous for their acidic water. Neutralization work is planned as part of the dam construction, this will involve passing the spring water through hoppers containing crushed limestone.

- T 2 Acid attack in outlet tunnel by H₂S and sulphur bacteria. All details as for Clendening Dam (C 11).

- T 3 Removal of cement paste by soft water leaching. Areas affected include the upstream face and downstream face, particularly at construction joints. Depths of concrete affected are generally 10 mm but up to 150 mm at construction joints.

1984 : Patching with a proprietary, chemically impregnated mortar together with caulking at upstream joints.

- T 4 Surface leaching of concrete by soft water in the 34 km long, 3.5 and 4.5 dia. water supply tunnel.

Essais de divers revêtements.

TSD = 48 mg/l
Ca = 3 mg/l
pH = 5,8.
IL = - 4,3

- T 5 Percolations à travers l'ouvrage de prise, d'épaisseur mince et fortement armé, aggravées par le lessivage provoqué par l'eau agressive de la retenue. Débits de fuites très importants aux joints de construction.

1965 : Sablage de la paroi en béton, curage et réparation des joints. Imprégnation à l'époxy de l'ensemble de la surface, application d'époxy-bitume.

1966 : Nouvelles réparations locales après vidange de la retenue et après inspection préalable par plongeurs.

- T 6 Percolations dans le barrage et détérioration du parement amont, due notamment à l'action des sulfates en faible concentration.

1961 : Réalisation d'un nouveau parement amont, de 1,5 m d'épaisseur, en béton de ciment aux pouzzolanes.

DTp = 38 mg/l
DP = 136 mg/l
pH = 7,4
Sulfates = 160 mg/l

- T 7 Détérioration par l'eau douce et travaux importants de réparation. Même description que pour le barrage de Gyfynys (G 6), mais sans injection en 1930; à la place, le parement amont du barrage de Transfynydd a reçu un enduit de ciment.

- V 1 Les analyses de l'eau de la retenue et à l'aval ont montré un lessivage progressif du béton par l'eau douce de la retenue. Ce béton comporte un dosage en ciment aux pouzzolanes de 200 kg/m³, des granulats siliceux et un E/C de 0,55.

	Retenue	Aval
TSD	= 80 mg/l	110 mg/l
DT	= 70 mg/l	40 mg/l
SO ₄	= 20 mg/l	35 mg/l
Alcalis	= 2 mg/l	20 mg/l
Silice	= 4 mg/l	11 mg/l
pH	= 7,5	9,5

Ces valeurs sont des moyennes, les valeurs mensuelles étant très variables.

- V 2 Percolations importantes et lessivage du ciment du barrage.

Réalisation d'un masque en béton armé, ancré au béton ancien et comportant un réseau de drainage au contact. Injection de la fondation et réseau de drainage.

- V 3 Les analyses exécutées avant la construction ont indiqué un fort risque d'agression par l'eau douce. Le parement amont du barrage, la galerie principale d'amenée et tous les autres conduits ont été enduits, au fur et à mesure de la mise en place du béton, avec un produit spécial commercialisé (mortier/coulis avec imprégnation chimique). De plus, pour les zones armées au contact avec l'eau, le projet avait prévu un faible taux de travail des aciers pour limiter l'intensité de la microfissuration.

Après la mise en eau, on a constaté des dépôts de carbonates dans le réseau de drainage du barrage, nécessitant des nettoyages périodiques (raclages, chasses) des drains forés dans la fondation et la mise en place de moyens d'adoucissement des eaux dans le puisard principal, pour éviter le colmatage des pompes.

	Retenue	Drains
TSD	= 130 mg/l	540 mg/l
Ca	= 20 mg/l	91 mg/l
Mg	= 2 mg/l	26 mg/l
(HCO ₃) ₂	= 66 mg/l	400 mg/l
pH	= 6,0	7,0
IL	= - 2,6	- 0,3

Experiments have been carried out with various coating systems.

TDS = 48 mg/l
Ca = 3 mg/l
pH = 5.8
LI = -4.3

- T 5 Leakage through the thin, highly reinforced intake structure accelerated under the leaching action of the aggressive reservoir water. Leakage was especially bad at construction joints.

1965 : The concrete face was sand blasted and poor joints broken out and patched. The whole surface was primed with epoxy and then treated with bituminous epoxy.

1966 : Re-patching of certain areas after reservoir drawdown and following prior inspections by divers.

- T 6 Seepage through the dam body and upstream face deterioration, partially due to weak sulphate attack.

1961 : A new upstream face, 1.5 m thick, constructed using pozzolanic cement concrete.

Temp. H = 38 mg/l
Perm. H = 136 mg/l
pH = 7.4
Sulphates = 160 mg/l

- T 7 Soft water attack and extensive remedial work. All details as for Gyfynys dam (G 6) with the exception that no grouting was carried out in 1930, but the upstream face of Trawsfynydd dam was cement rendered instead.

- V 1 Analyses of water in the reservoir and downstream showed that the dam concrete was being progressively leached by the soft reservoir water. The dam concrete contained 200 kg/m³ of pozzolanic cement, siliceous aggregate and had a w/c ratio of 0.55.

TDS = 80 mg/l (reservoir) and 110 mg/l (downstream)
Tot. H = 70 mg/l (reservoir) and 40 mg/l (downstream)
SO₄ = 20 mg/l (reservoir) and 35 mg/l (downstream)
Alkalis = 2 mg/l (reservoir) and 20 mg/l (downstream)
Silica = 4 mg/l (reservoir) and 11 mg/l (downstream)
pH = 7.5 (reservoir) and 9.5 (downstream)

Values given are mean values and are subject to considerable monthly variation.

- V 2 Considerable leakage and cement leaching from the main dam wall was evident.

A new reinforced concrete upstream facing was constructed, anchored to the old concrete and containing a drainage system at the contact with the main dam. Foundation grouting and drainage curtains were also formed.

- V 3 Analyses carried out prior to construction indicated a strong probability of soft water attack. The upstream face of the dam, the main power supply tunnel and all other waterways were coated with a proprietary brand of chemically impregnated mortar/slurry as construction proceeded. In addition, reinforced areas in contact with water were designed using low steel stresses to limit the degree of micro-fissuring.

After impounding, carbonate deposits built up in the drainage system of the dam requiring periodic rodding and flushing of foundation drainage holes and the installation of water softening arrangements in the main collector sump, to prevent the main pumps from becoming clogged.

TDS = 130 mg/l (reservoir) and 540 mg/l (drains)
Ca = 20 mg/l (reservoir) and 91 mg/l (drains)
Mg = 2 mg/l (reservoir) and 26 mg/l (drains)
(HCO₃)₂ = 66 mg/l (reservoir) and 400 mg/l (drains)
pH = 6.0 (reservoir) and 7.0 (drains)
LI = -2.6 (reservoir) and -0.3 (drains)

- W 1 Écoulements excessifs à travers le barrage-poids initial, provoquant le lessivage du ciment, des sous-pressions importantes et le décollement entre le béton de parement et le béton du corps du barrage. Campagne de carottage et d'analyses chimiques.
Réalisation d'un nouveau réseau de drainage, abaissement de l'évacuateur de crue, mise en place de tirants pour solidariser le béton de surface au corps du barrage.
1971 : Reconstruction du barrage en adoptant une digue en enrochement avec noyau central en terre.
- Z 1 Lessivage de l'hydrate de calcium par l'eau agressive, probablement douce; augmentation progressive des percolations, dépôts dans les galeries principales de drainage.
1952 : Réparation par injections exécutées pendant la construction du barrage.
1956 : Injections supplémentaires.
1958 à 1962 : Injections supplémentaires.

- W 1 Excessive water movement through the original gravity dam produced cement leaching, high uplift and the separation of upstream (facing) and main (heating) concretes. Core drilling and chemical analyses were carried out.
A new drainage curtain was provided, the spillway lowered and the separated concrete layers bolted together using post-tensioned ties.
1971 : The dam was re-constructed as a central earth core, rockfill dam.
- Z 1 Leaching of calcium hydroxide by aggressive, probably soft, water steadily increased seepage flows and deposited residue in the main drainage galleries.
1952 : Remedial grouting carried out during construction.
1956 : Additional grouting.
1958 to 1962 : Further grouting.

APPENDIX B/ANNEXE B
CODES AND STANDARDS/
CODES ET NORMES

Dans l'annexe A, on précise qu'un questionnaire a été diffusé aux pays membres préalablement à la rédaction du présent Bulletin. Les dernières questions concernaient les textes (normes, codes, règles, etc.) utilisés par les organismes concernés, en présence d'un milieu agressif. Dans la grande majorité des cas, aucune réponse n'a été donnée à cette question. Dans certains cas, on cite des manuels [8, 28]; dans d'autres cas, on se contente de donner des indications générales : « Codes de construction » ou « Documentation du fabricant ». La liste ci-dessous résume les réponses précises reçues.

It was mentioned in Appendix A that a questionnaire was circulated to member countries as part of the preparation for this Bulletin. The final questions asked what standards, codes, or other references were normally used by the agencies concerned when dealing with aggressive environments. In the great majority of cases no answer was given. In some cases, text books [8, 28] were quoted, in other cases generalized comments were made such as " Building Codes " or " Manufacturer's Literature ". The list below summarizes the replies to the questionnaire where these were specific.

- " Structural Use of Concrete ", BS 8110 : 1985, The British Standards Institution.
- " Beurteilung Bentonangreifender Wasser, Boden und Gase " (Evaluation of Liquids, Soils and Gases Aggressive to Concrete), DIN 4030.
- ACI 201. 2 R-77, " Guide to Durable Concrete ", ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1985.
- ACI 207.1R-70, " Mass Concrete for Dams and other Massive Structures ", ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1985.
- ACI 207. 2 R-73, " Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete ", ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1985.
- ACI 207. 3 R-79, " Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions ", ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1985.
- ACI 301-84, " Specifications for Structural Concrete for Buildings " ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, 1985.
- ACI 318-83, " Building Code Requirements for Reinforced Concrete ", ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, 1985.
- ACI 515.1R-79, " A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective and Decorative Barrier Systems for Concrete ", ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1985.
- " Durability of Concrete Construction ", ACI Monograph No. 4, Detroit, 1968.
- " Concrete Manual ", 8th Ed., US Dept. of the Interior, Washington, 1975.
- E. M. 1110-2-2000, " Engineering and Design - Standard Practice for Concrete ", US Army Corps of Engineers.
- Guirguis S., " Durability of Concrete Structures ", Technical Note TN 37, The Cement and Concrete Association of Australia, Sydney, 1980.
- Fulton F. S. (Ed), " Concrete Technology ", 5th Ed., The Portland Cement Institute, Johannesburg, 1977.
- Neville A. M., " Properties of Concrete ", Pitman, London, 1973.

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : mai 1989
N° 14352
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne



Computerized Archives on line

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



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