

ROLLER COMPACTED CONCRETE FOR GRAVITY DAMS.

State of the art.

BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU POUR BARRAGES - POIDS.

Technique actuelle.

Bulletin 75



1989

This Bulletin has been prepared by J. R. Graham (USA),
with the assistance from T. Yanagida (Japan)
Original text in English - J. P. Garbe was responsible for the
French translation, finalized by Y. Le May

*Ce Bulletin a été préparé par J. R. Graham (États-Unis),
avec la collaboration de T. Yanagida (Japon)*
*Texte original en anglais - Traduction en français sous la responsabilité
de J.-P. Garbe; mise au point finale par Y. Le May*

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.

ROLLER COMPACTED CONCRETE FOR GRAVITY DAMS.

State of the art.

BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU POUR BARRAGES - POIDS.

Technique actuelle.

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

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

PRÉFACE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION

2. CONSIDÉRATIONS LIÉES A LA
CONCEPTION

3. BÉTON COMPACTÉ AU ROU-
LEAU (BCR)

4. BÉTON COMPACTÉ AU ROU-
LEAU POUR BARRAGES (RCD)

5. RÉFÉRENCES

ANNEXE - Tableaux

CONTENTS

PREFACE

FOREWORD

1. INTRODUCTION

2. PLANNING CONSIDERATIONS

3. ROLLER COMPACTED CON-
CRETE (RCC)

4. ROLLER COMPACTED DAM
CONCRETE (RCD)

5. REFERENCES

APPENDIX - Tables

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	12
AVANT-PROPOS	14
1. INTRODUCTION	16
1.1. But du rapport	16
1.2. Historique	18
1.3. Technique actuelle dans le domaine des barrages	22
2. CONSIDÉRATIONS LIÉES A LA CONCEPTION	28
2.1. Généralités	28
2.2. Site et autres facteurs logistiques	28
2.3. Faisabilité économique de la construction de barrages en béton compacté au rouleau	30
2.3.1. Réduction de la durée de construction	30
2.3.2. Méthode rationalisée de construction	30
2.3.3. Économie de liant	32
2.3.4. Avantages supplémentaires	32
3. BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU (BCR)	34
3.1. Considérations et paramètres relatifs au projet de l'ouvrage	34
3.1.1. Généralités	34
3.1.2. Considérations sur le projet de l'ouvrage	34
3.1.3. Stabilité au glissement	36
3.1.4. Stabilité au renversement	38
3.1.5. Variations de température et de volume	38
3.1.6. Joints de contraction	42
3.1.7. Joints de reprise	46
3.1.8. Galeries et tunnels d'accès	48
3.1.9. Maîtrise des percolations	48
3.1.10. Appareils d'auscultation	50
3.1.11. Fondations	52
3.1.12. Évacuateurs de crue	54
3.1.13. Ouvrages de vidange et de restitution	56
3.2. Matériaux et dosages	56
3.2.1. Généralités	56
3.2.2. Maniabilité	60
3.2.3. Lients	62
3.2.4. Granulats	66
3.2.5. Méthodes de dosage pour le BCR	70
3.2.6. Adjuvants	86
3.3. Considérations sur la construction	86
3.3.1. Généralités	86
3.3.2. Catégories de barrages en BCR	88
3.3.3. Organisation de la construction	90
3.3.4. Méthodes de fabrication et de mise en place du BCR	92
3.3.5. Méthodes spéciales de construction	114
3.3.6. Assurance et contrôle de la qualité	120

TABLE OF CONTENTS

PREFACE	13
FOREWORD	15
1. INTRODUCTION	17
1.1. Purpose	17
1.2. Historical Background	19
1.3. State of the Art in Dams	23
2. PLANNING CONSIDERATIONS	29
2.1. General	29
2.2. Siting and Other Logistic Factors	29
2.3. Economical Feasibility of Roller Compacted Concrete Dam Construction..	31
2.3.1. Shortening Construction Period	31
2.3.2. Rationalized Construction Process	31
2.3.3. Cement Materials Saving	33
2.3.4. Additional Benefits	33
3. ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC)	35
3.1. Structural Design Parameters and Considerations	35
3.1.1. General	35
3.1.2. Design Considerations	35
3.1.3. Sliding Stability	37
3.1.4. Stability Against Overturning	39
3.1.5. Thermal and Volume Changes	39
3.1.6. Contraction Joints	43
3.1.7. Lift Joints	47
3.1.8. Galleries and Adits	49
3.1.9. Seepage Controls	49
3.1.10. Instrumentation	51
3.1.11. Foundation	53
3.1.12. Spillways	55
3.1.13. Outlet Works	57
3.2. Materials and Mixture Proportioning	57
3.2.1. General	57
3.2.2. Workability	61
3.2.3. Cementitious Materials	63
3.2.4. Aggregates	67
3.2.5. Mixture Porportioning Methods for RCC	71
3.2.6. Admixtures	87
3.3. Construction Considerations	87
3.3.1. General	87
3.3.2. Categories of RCC Dams	89
3.3.3. Construction Planning	91
3.3.4. RCC Production and Placing Methods	93
3.3.5. Special Construction Methods	115
3.3.6. Quality Assurance and Control	121

3.4. Évaluation du comportement	132
3.4.1. Généralités	132
3.4.2. Comportement de l'ouvrage et des matériaux	134
3.4.3. Étanchéité	134
3.5. Recherche et développement	134
3.5.1. Généralités	134
3.5.2. Études terminées	136
3.5.3. Recherches futures	140
4. BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU POUR BARRAGES (RCD)	160
4.1. Considérations et paramètres relatifs au projet de l'ouvrage	160
4.1.1. Généralités	160
4.1.2. Considérations sur le projet	160
4.1.3. Stabilité au glissement	162
4.1.4. Stabilité au renversement	162
4.1.5. Variations de température et de volume	162
4.1.6. Joints de contraction	164
4.1.7. Joints de reprise	166
4.1.8. Galeries et tunnels d'accès	168
4.1.9. Maîtrise des percolations	168
4.1.10. Appareils d'auscultation	168
4.1.11. Fondations	168
4.1.12. Évacuateurs de crue	168
4.1.13. Ouvrages de vidange et de restitution	170
4.2. Matériaux et dosages	170
4.2.1. Généralités	170
4.2.2. Consistance	172
4.2.3. Matériaux constituants	172
4.2.4. Méthode de dosage du béton RCD	174
4.3. Considérations sur la construction	178
4.3.1. Généralités	178
4.3.2. Organisation de la construction	180
4.3.3. Méthodes de fabrication et de mise en place du béton RCD.....	182
4.3.4. Méthodes de construction	186
4.3.5. Contrôle de la qualité	190
4.4. Évaluation du comportement	198
4.4.1. Généralités	198
4.4.2. Évaluation du comportement mécanique et de la sécurité des barrages terminés	200
4.4.3. Étanchéité du béton RCD	200
4.4.4. Évaluation de la qualité du béton RCD par carottage	200
4.5. Recherche et développement	204
4.5.1. Généralités	204
4.5.2. Études terminées	206
4.5.3. Recherches futures	210
5. RÉFÉRENCES	229
ANNEXE	239
Liste d'ouvrages BCR et RCD	240
A. Barrages-poids	240
B. Sections déversantes et évacuateurs de crue	246
C. Diverses applications sur des barrages	248

3.4. Performance Evaluation	133
3.4.1. General	133
3.4.2. Structural and Materials Behavior	135
3.4.3. Watertightness	135
3.5. Research and Development	135
3.5.1. General	135
3.5.2. Completed Research	137
3.5.3. Future Research	141
4. ROLLER COMPACTED DAM CONCRETE (RCD)	161
4.1. Structural Design Parameters and Considerations	161
4.1.1. General	161
4.1.2. Design Considerations	161
4.1.3. Sliding Stability	163
4.1.4. Stability Against Overturning	163
4.1.5. Thermal and Volume Change	163
4.1.6. Contraction Joints	165
4.1.7. Lift Joints	167
4.1.8. Galleries and Adits	169
4.1.9. Seepage Control	169
4.1.10. Instrumentation	169
4.1.11. Foundation	169
4.1.12. Spillways	169
4.1.13. Outlet Works	171
4.2. Materials and Mixture Proportioning	171
4.2.1. General	171
4.2.2. Consistency	173
4.2.3. Materials	173
4.2.4. Procedure for Mixture Proportioning of RCD	175
4.3. Construction Considerations	179
4.3.1. General	179
4.3.2. Planning	181
4.3.3. RCD Production and Placing Methods	183
4.3.4. Construction Practices	187
4.3.5. Quality Control	191
4.4. Performance Evaluation	199
4.4.1. General	199
4.4.2. Evaluation of Completed Dams from the Viewpoint of Structural Behavior and Safety	201
4.4.3. Watertightness of RCD	201
4.4.4. Quality Evaluation of RCD by Drilled Cores	201
4.5. Research and Development	205
4.5.1. General	205
4.5.2. Completed Research	207
4.5.3. Future Research	211
5. REFERENCES	229
APPENDIX	239
List of RCC and RCD Applications	241
A. Gravity Dams	241
B. Overflow Sections and Spillways	247
C. Miscellaneous Dam Applications	249

LISTE DES FIGURES ET DES PHOTOS

- Fig. 1. — Barrage Willow Creek - Compositions de BCR - Augmentation adiabatique de la température.
- Fig. 2. — Barrage Willow Creek - Isothermes de l'évacuateur de crue, en °C (°F).
- Fig. 3. — Barrage Willow Creek - Isothermes pour un profil non déversant, en °C (°F).
- Fig. 4. — Effet de la durée de vibration et du dosage en eau sur la densité compactée du béton aux cendres volantes.
- Fig. 5. — Effet de la durée de vibration et du dosage en eau sur la densité compactée du béton au ciment Portland.
- Fig. 6. — Courbes de dosage pour des résistances égales du béton - Ciment du type II.
- Fig. 7. — Effet du volume de gros granulats sur le compactage.
- Fig. 8. — Granulométrie des granulats pour BCR.
- Fig. 9. — Résistances à la compression obtenues à partir d'essais sur des BCR avec des dosages variables en ciment.
- Fig. 10. — Courbes caractéristiques de résistances du BCR obtenues à partir d'essais sur des bétons avec des dosages variables en ciment.
- Fig. 11. — Effet de la largeur du barrage et du dispositif de transport du BCR sur les cadences de bétonnage.
- Fig. 12. — Barrage Willow Creek - Graphique de contrôle de la densité *in situ*.
- Fig. 13. — Barrage Tamagawa - Température maximale admissible.
- Fig. 14. — Disposition des ouvrages d'évacuation et des galeries.
- Fig. 15. — Diagramme d'étude de la composition du béton.
- Fig. 16. — Relation entre le dosage en eau et l'indice CV.
- Fig. 17. — Essai de masse volumique du mortier.
- Fig. 18. — Relation entre le dosage en eau et la résistance à la compression du béton RCD.
- Fig. 19. — Relation entre le dosage en liant et la résistance à la compression.
- Fig. 20. — Relation entre le rapport sable/granulats et la valeur CV du béton RCD.
- Fig. 21. — Compactage du contact entre les deux bétons (béton traditionnel et béton RCD).
- Fig. 22. — Passage sur des galeries.
- Fig. 23. — Résistance à long terme du béton RCD.
- Fig. 24. — Résultats des essais de perméabilité effectués dans un forage du barrage Ohkawa.

LIST OF FIGURES AND PHOTOGRAPHS

- Fig. 1. — Willow Creek Dam RCC Mixtures - Adiabatic Temperature Rise.
- Fig. 2. — Willow Creek Dam - Spillway Thermal Contours in °C (°F).
- Fig. 3. — Willow Creek Dam - Non-Overflow Section Thermal Contours in °C (°F).
- Fig. 4. — Effects of vibration time and water content on the compacted density of fly ash concrete.
- Fig. 5. — Effect of vibration time and water content on the compacted density of Portland cement concrete.
- Fig. 6. — Proportioning curves for equal strength concrete - Type II cement.
- Fig. 7. — Effect of coarse aggregate volume on compaction.
- Fig. 8. — Aggregate grading for RCC.
- Fig. 9. — Compressive strength data obtained from tests of RCC mixtures with varying cement contents.
- Fig. 10. — Typical RCC strength curves developed from tests conducted on concretes with varying proportions of cement.
- Fig. 11. — Effect of dam width and delivery system on RCC placing rates.
- Fig. 12. — Willow Creek Dam in-site density control chart.
- Fig. 13. — Tamagawa Dam - Allowable maximum temperature.
- Fig. 14. — Layout of outlet works and galleries structures.
- Fig. 15. — Flow chart of mixture design.
- Fig. 16. — Relation between unit water content and VC value.
- Fig. 17. — Unit weight test of mortar.
- Fig. 18. — Relation between unit water content and compressive strength of RCD.
- Fig. 19. — Relation between unit content of cementitious materials and compressive strength.
- Fig. 20. — Relation of sand-aggregate ratio and VC value of RCD.
- Fig. 21. — Compaction of interface of the two mixtures (conventional concrete and RCD).
- Fig. 22. — Overbridge across galleries.
- Fig. 23. — Long-term strength of RCD concrete.
- Fig. 24. — Results of permeability tests performed in a borehole at Ohkawa Dam.

- Photo 1. — Bulldozer épandant du BCR.
- Photo 2. — Rouleau vibrant automoteur, à double tambour, compactant du BCR.
- Photo 3. — Appareil de mesure de la consistance (diamètre 48 cm).
- Photo 4. — Béton déchargé d'un camion dumper et étalé par des bulldozers.
- Photo 5. — Compactage du béton RCD par un rouleau vibrant automoteur.
- Photo 6. — Traitement des joints de reprise par une balayeuse mécanique.
- Photo 7. — Traitement des joints de reprise par jet d'eau.
- Photo 8. — Épandage de mortier sur des joints de reprise.
- Photo 9. — Joints transversaux réalisés par une lame vibrante montée sur une machine à découper les joints.
- Photo 10. — Mesure de densité par radio-isotope.
- Photo 11. — Carotte extraite du corps du barrage.
- Photo 12. — Contrôle de l'épaisseur de béton épandu, au moyen d'un niveau laser.
- Photo 13. — Planche d'essai.
- Photo 14. — Barrage Shimajigawa.
- Photo 15. — Barrage Shimajigawa - Paroi latérale d'une galerie de visite.
- Photo 16. — Carottes extraites du corps du barrage.

- Photo 1. — Bulldozer spreading.
- Photo 2. — Double-drum, self-propelled vibratory roller compacting RCC.
- Photo 3. — Consistency meter [diameter 48 cm (19 in.)].
- Photo 4. — Concrete discharged from the dump truck and spread by bulldozers.
- Photo 5. — RCD compacted by the self-propelled vibratory roller.
- Photo 6. — Lift joints treatment by motor sweeper.
- Photo 7. — Lift joints treatment by water jet.
- Photo 8. — Spreading of mortar on lift joints.
- Photo 9. — Transverse joints provided by the vibrating blade mounted on joint-cutting machine.
- Photo 10. — Density test by radio-isotope.
- Photo 11. — Core drilled from dam body.
- Photo 12. — Control of spreading thickness by laser level.
- Photo 13. — Test fill.
- Photo 14. — Shimajigawa Dam.
- Photo 15. — Side wall of inspection gallery at Shimajigawa Dam.
- Photo 16. — Cores drilled from dam body.

PRÉFACE

Le béton compacté au rouleau est une nouvelle technique caractérisée principalement par l'utilisation de rouleaux pour le compactage du béton. Il en résulte que le matériau est plus dense, avec une teneur en eau plus faible, que le béton classique de barrage. Le béton est mis en place par couches minces sur toute la longueur de l'ouvrage, ce qui permet un bétonnage très rapide.

Cette technique a été mise en œuvre avec succès sur un certain nombre de barrages dans le monde, dont la plupart, à ce jour, sont situés au Japon et aux États-Unis. Le béton compacté au rouleau est de plus en plus utilisé pour la construction de barrages. Aussi la publication d'un Bulletin détaillé a-t-elle été jugée nécessaire. La composition du béton est classique, et des densités et des résistances élevées sont obtenues. Le coût plus bas par rapport au béton traditionnel vibré résulte principalement des opérations continues de malaxage, transport et épandage, ainsi que des simplifications possibles du projet accompagnées, sur le plan financier, d'économies substantielles sur les charges d'intérêts au cours de la période de construction plus courte. Ainsi qu'il est indiqué dans l'Avant-Propos et discuté dans le Bulletin, diverses méthodes de mise en œuvre du béton compacté au rouleau existent, mais le matériau est toujours du béton.

Une technique différente est déjà envisagée par ceux qui cherchent à maximiser les avantages offerts par l'utilisation de rouleaux et de matériel de travaux routiers dans la construction de barrages en béton. A partir des expériences connues à ce jour et de l'exemple des réparations de Tarbela où plusieurs millions de mètres cubes de roche détruits par érosion furent remplacés par un mélange de gravier et de ciment compacté au rouleau, des esprits audacieux prévoient des économies encore plus grandes; le corps du barrage pourrait être constitué de matériaux tout-venant stabilisés par du ciment, qui seraient peu coûteux et très probablement perméables, l'étanchéité étant assurée par un masque amont. Si on se passe également du profil poids traditionnel et des coffrages qui l'accompagnent, le coût final peut être encore plus bas.

Ce Bulletin présente un examen détaillé de la première génération de grands barrages en béton compacté au rouleau, ainsi que les techniques utilisées; il constitue une excellente introduction à un développement prometteur et passionnant de la technique.

Locarno, janvier 1988

G. Lombardi,
Président de la CIGB

PREFACE

Roller compacted concrete is a new technique characterized principally by its use of rollers for compaction. The resulting material is denser with a lower percentage of water than the usual dam concrete. The mix is spread in thin layers over the whole length of the dam, enabling concreting to proceed very quickly.

This technique has been used successfully in a number of major dams in the world, most of which, to date, have been in Japan and the USA. The use of roller compacted concrete for dam construction continues to increase. This is why a detailed Bulletin was considered necessary at this time. Concrete mix designs are traditional, and high strengths and densities are obtained. The lower cost as compared with conventional, vibrated concrete derives chiefly from the opportunities for continuous mixing, transporting and spreading, as well as from the possible simplifications of the design, accompanied from the financial point of view by substantial savings on interest charges during the shorter construction time. Approaches to roller compacted concrete differ as mentioned in the Foreword and discussed in the Bulletin, but the material is still concrete.

A different technique is already being postulated by those seeking to maximize the benefits offered by the use of rollers and related road-making equipment in concrete dam construction. From experience to date, and the example of the Tabela repairs where several million cubic meters of rock destroyed by erosion were replaced with cement-stabilized roller compacted gravel, some daring spirits are predicting developments towards even greater savings : the dam body might be unprocessed cement-stabilized materials which would be cheap and most likely pervious, with an upstream facing for watertightness. If the traditional gravity profile and attendant formwork are dispensed with as well, the final costs can be still lower.

This Bulletin is a detailed review of the first generation of large roller compacted concrete dams with the respectively used techniques and provides an excellent introduction to promising and exciting developments.

Locarno, January 1988

G. Lombardi
President, ICOLD

AVANT-PROPOS

Ce Bulletin, intitulé « Béton compacté au rouleau pour barrages-poids », rassemble les informations disponibles sur une technique en pleine évolution car elle n'a encore fait l'objet que de quelques réalisations. Il serait donc vain d'essayer de faire entrer cette technique dans un cadre rigide. Le Bulletin se limite donc à l'état actuel de celle-ci et ne vise en aucune façon à présenter des recommandations; de plus, il ne doit pas être considéré comme une source d'informations pour rédiger des spécifications techniques.

Le présent document ne porte que sur l'utilisation du béton compacté au rouleau dans la construction de barrages-poids. L'utilisation du sol-ciment dans la construction de barrages n'est traitée, à ce jour, dans aucun Bulletin de la CIGB, le Bulletin 54 « Sol-ciment pour barrages en remblai » concernant seulement l'adoption de ce matériau pour la protection des talus.

Après une introduction générale comportant l'historique et une description de la technique actuelle, assortie de quelques considérations sur la conception, le Bulletin traite dans les Chapitres 3 et 4 des expériences américaines et japonaises. En fait, aux États-Unis et au Japon, deux méthodes assez différentes ont été mises au point.

La méthode appelée Américaine (BCR) est souple et tend à adapter le projet de barrage aux caractéristiques du béton compacté au rouleau, en vue d'obtenir les meilleurs avantages techniques et économiques.

La méthode Japonaise (RCD) considère, au contraire, le béton compacté au rouleau comme un nouveau procédé de construction et non comme une nouvelle doctrine de projet. Elle s'appuie sur le concept que cette doctrine est la même dans le cas des barrages en béton compacté au rouleau et dans celui des barrages en béton classique.

*

**

L'idée d'un tel Bulletin remonte à 1978; un projet préliminaire fut préparé en 1981 par M. Brook (BNCOLD). Le sujet du béton compacté au rouleau fut confirmé dans la mission du Comité des Matériaux pour Barrages en Béton (Londres, 1983). M. J. Graham (USCOLD), chargé de la préparation du Bulletin, présenta un nouveau projet de rapport (Lausanne, 1985). Un chapitre spécial sur la technique japonaise fut ensuite rédigé par M. T. Yanagida (JANCOLD). Après une mise au point des deux premiers chapitres, le texte définitif préparé par M. J. Graham a été approuvé par la 56^e Réunion Exécutive (San Francisco, 1988).

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

FOREWORD

“ Roller Compacted Concrete for Gravity Dams ” summarizes the information now available for a technique still in the evolutionary phase. It would therefore be wrong to attempt to force it into rigid schemes of prearranged recommendations. For this reason, the Bulletin represents merely a “ state of the art ” report and is in no way intended to be a code of recommended practice or a source for writing specifications.

It deals with roller compacted concrete for dams of the gravity type only; the use of soil-cement in the construction of dams is not treated, at present, in any ICOLD Bulletin. Bulletin No. 54 “ Soil-Cement for Embankment Dams ” deals only with applications of soil-cement for slope protection.

After a general introduction, with a historical background and a review of present technique, with some typical planning considerations, the Bulletin deals separately in Chapters 3 and 4 with American and Japanese experience, where two rather divergent approaches have been developed.

The so-called American (RCC) approach is more flexible and inclined to fit the dam design to roller compacted concrete performance, in order to obtain the best technical and economic benefits.

The Japanese (RCD) approach considers roller compacted concrete as a new construction method and not as a new design philosophy. It is based on the concept that the design philosophy of roller compacted concrete dams should be the same as that of conventional concrete dams.

**

The first idea for this Bulletin dates back to 1978 and a preliminary draft was prepared in 1981 by Mr. Brook (BNCOLD). The subject of Roller Compacted Concrete was confirmed in the terms of reference of the Committee on Materials for Concrete Dams (London, 1983). The responsibility of the Bulletin was turned over to Mr. J. Graham (USCOLD) who prepared a new draft report (Lausanne, 1985). A separate chapter on Japanese technology was then prepared by Mr. T. Yanagida (JANCOLD). After a review of the two first chapters in a unified form, the final text, consolidated by Mr. J. Graham, was presented and approved at the 56th Executive Meeting (San Francisco, 1988).

P. Bertacchi
Chairman, Committee on Materials
for Concrete Dams

1. INTRODUCTION

1.1. BUT DU RAPPORT

Le but du présent rapport est de fournir aux ingénieurs du monde entier un résumé global des dernières évolutions dans le domaine de l'utilisation du béton compacté au rouleau dans la construction des barrages-poids. Étant donné les progrès continus et rapides dans plusieurs pays, le présent Bulletin ne peut être qu'un rapport sur la technique actuelle, qui devra être ultérieurement mis à jour.

Le terme « béton compacté au rouleau » s'applique au béton utilisé dans le procédé de construction qui associe les techniques économiques et rapides de mise en place de matériaux de remblai aux excellentes propriétés mécaniques du béton, telles que sa résistance et sa pérennité. De nombreuses études ont été faites dans différents pays et présentées sous diverses expressions, par exemple, le béton compacté au rouleau, le béton compacté au rouleau pour barrages, le béton roulé, le « rollcrete », le béton maigre et le béton maigre roulé. Ces termes ont été utilisés pour décrire, au moins sur le plan générique, un seul et même procédé, bien qu'un examen plus approfondi fasse ressortir certaines différences minimes.

On peut distinguer deux approches principales et les classer comme suit :

- « Le Béton Compacté au Rouleau » (BCR) mis au point principalement aux États-Unis (en anglais : RCC).
- « Le Béton Compacté au Rouleau pour Barrages » mis au point au Japon (en anglais : RCD, sigle qui sera également adopté en français).

Elles sont examinées respectivement dans les Chapitres 3 et 4 du présent Bulletin.

La construction de barrages avec du béton compacté au rouleau a été étudiée depuis juin 1970 environ. Depuis 1975, de grands progrès ont été réalisés, et depuis 1980 le monde entier a trouvé un intérêt croissant à ce type de béton. A ce jour, les barrages en béton compacté au rouleau font l'objet d'études, sont conçus et construits dans de nombreux pays industrialisés et de pays en voie de développement du monde entier. L'utilisation du béton compacté au rouleau dans la construction de barrages-voûtes sera certainement mentionnée dans de futures mises à jour du Bulletin.

L'intérêt porté à ce type de barrage a augmenté pour plusieurs raisons, la plus importante étant la construction économique et rapide. Dans de nombreux pays, le coût de construction de barrages en béton classique a augmenté de façon nettement plus rapide que le coût similaire des barrages en remblai. C'est cet élément spécifique, allant de pair avec le fait que le béton est un matériau de très bonne qualité, notamment en ce qui concerne sa pérennité, qui a poussé les projeteurs à rechercher de nouvelles méthodes pour l'utiliser dans la construction des barrages. Le compactage du béton au rouleau dans la construction d'un barrage évite certains inconvénients liés au barrage en béton traditionnel et permet, en même temps, de profiter de certains avantages présentés par la construction des barrages en remblai.

1. INTRODUCTION

1.1. PURPOSE

The purpose of this Bulletin is to make available to engineers around the world a generally current synopsis of the developments to date in using roller compacted concrete for gravity dam construction. Because of the continual and rapid advancements in several nations, this Bulletin will merely serve as a status report, and it will need to be updated in the future.

The term "roller compacted concrete" describes concrete used in the construction process which combines the economical and rapid placing techniques of embankment materials and the excellent mechanical properties of concrete, such as strength and durability. Many studies have been made in different countries under various names; e.g., roller compacted concrete, roller compacted dam concrete, rolled concrete, rollcrete, lean concrete, and rolled lean concrete. Such terms have been used to describe, at least generically, a similar process, although upon a closer look some discrete differences are revealed.

Two principal approaches can be identified and classified as :

- Roller Compacted Concrete (RCC) developed principally in the USA, and
- Roller Compacted Dam Concrete (RCD) developed in Japan.

They are dealt with respectively in Chapters 3 and 4 of the Bulletin.

Dam construction using roller compacted concrete has been studied since about 1970. Considerable advancements have been made since about 1975, and a burgeoning worldwide interest in the concept has flourished since about 1980. Today, roller compacted concrete dams are being discussed, designed, and constructed in many of the developed and developing nations of the world. Its use in the construction of arch dams will no doubt be reported in future updates of this Bulletin.

Interest in this type of dam has increased for several reasons, the most prominent being economics and speed of construction. In many nations, the costs of constructing conventional concrete dams have increased significantly faster than similar costs for embankment dams. This, coupled with the fact that concrete is such a good, durable, long-lasting construction material, has stimulated designers to seek new ways of using concrete in dam construction. Roller compaction of concrete in dam construction obviates some of the disadvantages of the conventional concrete dam approach and, at the same time, makes use of some of the advantages inherent in embankment dam construction.

De nombreuses études sur le béton compacté au rouleau ont été effectuées ces dernières années et de nombreux rapports et articles ont été rédigés pour décrire la technique actuelle qui progresse à grands pas.

Le présent Bulletin traite de tous les aspects du béton compacté au rouleau pour barrages, de la conception jusqu'à l'entretien, en passant par le projet et la construction. Le choix des matériaux et la composition du béton sont traités ici, de même que le contrôle de la qualité. Toute la documentation disponible, y compris celle qui figure dans les références bibliographiques du Chapitre 5, devront être considérées comme une source de premier ordre et être consultées par tout utilisateur sérieux de béton compacté au rouleau.

1.2. HISTORIQUE

Pendant de nombreuses années, le béton dit « roulé » a été utilisé comme sous-couche pour les revêtements de routes et de pistes d'aviation. A partir de la fin des années quarante, il a été largement utilisé au Royaume-Uni où il était généralement appelé « béton maigre » ou encore « béton maigre sec ». Il a été utilisé principalement pour constituer les couches de 150 à 250 mm d'épaisseur sous les revêtements bitumineux.

L'intérêt porté au béton roulé dans les cas précités était apparemment dû à un certain nombre de facteurs, notamment au fait qu'il s'agit d'un matériau facile à fabriquer et à mettre en place et qu'il ne demande aucun matériel ou installation particulier. Les bétons nécessaires aux travaux de dallage présentent généralement un faible dosage en ciment, de l'ordre de 110 à 120 kg/m³, et impliquent l'utilisation de granulats lavés convenant au béton à surface plane. Le dosage en eau est choisi pour produire un béton qui ne s'affaisse pas et qui s'adapte au compactage au rouleau, le matériau étant mis en place sans joints de retrait. Du point de vue du comportement du béton, la grande faiblesse a été l'apparition de fissures transversales. Cette caractéristique fortement indésirable a eu une grande influence sur les dosages et la conception du dallage.

Un des jalons importants dans l'évolution des méthodes de construction des barrages en béton a été l'exécution, entre 1961 et 1964, du barrage Alpe Gera en Italie [23] (*). Un béton maigre a été utilisé pour ce barrage et, bien qu'il n'ait pas été roulé, il a été mis en place en couches de 700 mm d'épaisseur d'une rive à l'autre de la vallée (évitant ainsi la construction traditionnelle par plots). Le compactage a été réalisé au moyen de bancs de pervibrateurs fixés à l'arrière de tracteurs et les joints de retrait ont été découpés au travers de chaque couche. L'étanchéité du barrage a été réalisée en recouvrant totalement le parement amont de plaques métalliques. Une méthode analogue a été appliquée peu de temps après lors de la construction du barrage Quaira Della Miniera, en Italie.

Les avantages éventuels du béton maigre sec dans son emploi comme béton interne pour les barrages-poids ont été signalés par Paton [52] au cours d'une intervention au Congrès de Montréal (1970) de la Commission Internationale des Grands Barrages; mais, dès 1960-61, un béton maigre ne s'affaissant pas, malaxé dans une centrale à béton ordinaire, avait été mis en place par la méthode de remblayage pour constituer le noyau imperméable du batardeau du barrage Shihmen,

(*) Les chiffres entre crochets renvoient à la liste des références - Chapitre 5.

Many studies on roller compaction of concrete have been conducted in recent years, and numerous reports and articles have been written to describe the rapidly advancing state of the art.

This Bulletin addresses all aspects of roller compacted concrete for dams from planning through design, construction, and maintenance. Materials selection and concrete mixture proportioning are discussed, as well as quality control. The published material available, including that listed in the References/Bibliography in Chapter 5, should be considered vital resource material and necessary reading for the serious roller compacted concrete user.

1.2. HISTORICAL BACKGROUND

For many years, so-called "rolled concrete" was used for the sub-base of roads and airfield pavements. Since the late 1940's, it has been widely used in the United Kingdom (UK) where it generally has been referred to as "lean concrete" or "dry lean concrete". Mainly, it has been used as a base of 150 to 250 mm (6 to 10 in) thickness under bituminous surfacings.

The popularity of rolled concrete for this use has been attributed to a number of factors, primarily that it is a simple material to produce and place, and it requires no unique construction facilities or equipment. The mixtures for paving work usually have a low cement content, about 110 to 120 kg/m³ (185 to 200 lb/yd³), and involve the use of washed aggregates suitable for plain concrete. The water content is chosen to produce no-slump concrete to suit compaction by rolling, and the material is laid without contraction joints. The main deficiency, from a performance point of view, has been the occurrence of transverse cracks. This undesirable characteristic has had a major influence on mixture proportioning and pavement design.

An important milestone in developing new construction methods for concrete dams was the construction of the Alpe Gera Dam in Italy between 1961 and 1964 [23] (*). Lean concrete was used for this dam, and although it was not rolled, it was laid in 700 mm (27.5 in) thick layers from one side of the valley to the other (thereby avoiding construction by conventional monoliths). Compaction was achieved using banks of immersion vibrators mounted on the backs of tractors, and contraction joints were cut through each layer. The dam was made watertight by completely covering the upstream face with steel sheets. A similar construction method was used on the Quaira Della Miniera Dam in Italy soon afterward.

The possible merits of dry lean concrete as an interior concrete for gravity dams were suggested by Paton [52] in a contribution to an International Commission on Large Dams (ICOLD) discussion, although in 1960-61 lean no-slump concrete, mixed in a regular concrete batching plant, was placed by earthfill methods to form the impervious core of the cofferdam at Shihmen Dam, Taiwan. This application was described by Lowe at the first American Society of Civil Engineers (ASCE)

(*) Numbers between brackets refer to references - Chapter 5.

à Taïwan. Cette application a été décrite par Lowe à la première conférence « Water Resources Engineering » de la Société Américaine des Ingénieurs Civils (ASCE) à Omaha, Nebraska, en 1962 [42]. Dans son étude qui n'a pas été publiée, il suggérait l'emploi du béton compacté au rouleau pour une section déversante d'un barrage-poids, au sein d'un barrage en remblai. Il lança également le mot « rollcrete » comme abréviation de « roller compacted concrete ». Depuis lors, un exemplaire de cette étude a été publié dans les Comptes Rendus de la Conférence Internationale sur le béton roulé, organisée les 9 et 10 juin 1981 par l'Association d'Information et de Recherche de l'Industrie de la Construction (CIRIA), p. W-1 à W-5. Le concept d'un barrage-poids en béton maigre roulé, dont le but est d'optimiser les avantages propres au matériau, a été développé ultérieurement et décrit dans un rapport de Moffat (1973) au XI^e Congrès de la CIGB [45].

A peu près à la même époque, des idées analogues faisaient leur chemin aux États-Unis. Au cours d'une conférence sur « la construction rapide de barrages en béton », Raphael (1970) [56] présenta un rapport intitulé « le barrage-poids optimal », dans lequel il suggérait que, si le matériau brut était stabilisé par du ciment, il était alors possible d'augmenter la pente d'un ouvrage en remblai. En partant de ce concept de base, il présenta le barrage-poids optimal comme étant la solution la plus économique entre les extrêmes, c'est-à-dire, le barrage en remblai de volume élevé (qui ne contient pas de ciment) et le barrage-poids en béton classique de faible volume.

Cannon (1972-1974) de la « Tennessee Valley Authority » (TVA) a présenté des études intitulées « Construction de barrages en béton par la méthode du compactage des terres » [8] et « Compactage du béton de masse au rouleau vibrant », dans lesquelles il donnait les résultats d'essais effectués par la TVA sur du béton compacté au rouleau vibrant. Ces résultats furent en partie tirés du premier essai en vraie grandeur de béton compacté au rouleau, effectué en 1970 sur le barrage Tims Ford.

Au Japon, le Ministère de la Construction du Gouvernement Japonais a constitué un Comité dont les membres sont des spécialistes en matière de barrages en béton et qui est dirigé par le Dr Kokubu; depuis 1974, ce Comité a servi à promouvoir la recherche concernant la construction de barrages en béton. Une partie de cette recherche porte sur la méthode s'appliquant au béton compacté au rouleau pour barrages (RCD) et qui a fait l'objet de recherches séparées au Japon [29, 30, 69, 70]. Un essai en vraie grandeur effectué sur le batardeau du barrage Ohkawa au Japon (volume = 10 000 m³) [64, 65] en 1976, et les résultats des recherches de base et des études prouvèrent que la méthode RCD pouvait être appliquée au corps même du barrage. Le barrage Shimajigawa (Japon) [14, 67], premier barrage en béton compacté au rouleau (RCD) au monde (volume = 317 000 m³), fut terminé en 1980; il fut suivi, en 1987, par le barrage Tamagawa (Japon) [25, 26, 27, 78] qui est le plus grand et le plus haut barrage en béton compacté au rouleau (RCD) au monde (hauteur = 100 m, volume = 1 150 000 m³).

Une recherche approfondie en laboratoire et une étude de conception furent dirigées par Price (1977) à l'Université de Newcastle, en Grande-Bretagne [54]. Des essais furent exécutés, en 1976, aux ouvrages de traitement de Tamar, en Cornouailles, sur du béton maigre contenant des cendres volantes, et les résultats furent communiqués par Dunstan (1977) de la « South West Water Authority » [19]. Ultérieurement, Dunstan joua un rôle de première importance dans l'Association d'Information et de Recherche de l'Industrie de la Construction (CIRIA) qui soutint un projet de recherche de 1978 à 1980 comprenant deux essais de grande envergure

Water Resources Engineering Conference, Omaha, Nebraska, 1962 [42]. In the unpublished paper he suggested the use of roller compacted concrete for a gravity dam overflow section within an earthfill dam. Also, he coined the word "rollcrete" as an abbreviation of « *roller compacted concrete* ». A copy of that paper has since been published in the Proceedings of the International Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) Conference on rolled concrete for dams held on June 9-10, 1981, p. W-1 to W-5. The concept of a rolled lean-concrete gravity dam, designed to optimize the inherent advantages of the material, was subsequently developed and was described in a paper by Moffat (1973) to the XIth Congress of ICOLD [45].

Similar ideas were being developed at about the same time in the USA. At a conference on "Rapid Construction of Concrete Dams", Raphael (1970) [56] presented a paper entitled "The Optimum Gravity Dam" in which he proposed that if "as-dug" material is stabilized with cement, it is possible to steepen the slopes of a fill structure. From this basic concept, he postulated the optimum gravity dams as being the most economical solution between the extremes of the high-volume earthfill (containing no cement) and the lesser volume, conventional concrete gravity dam.

Cannon (1972, 1974) of the Tennessee Valley Authority (TVA) presented papers entitled "Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods" [8] and "Compaction of Mass Concrete with Vibratory Roller" in which he gave results from tests by the TVA on concrete compacted by vibrating roller. These results were obtained in part from the first full-scale trial of roller compacted concrete in the USA which was conducted in 1970 at Tims Ford Dam.

In Japan, the Ministry of Construction of the Japanese Government has organized a committee consisting of specialists in concrete dams headed by Dr. Kokubu, and since 1974 this committee has been promoting research concerning construction of concrete dams. A part of this research is the work being done on the Roller Compacted Dam Concrete (RCD) method which was investigated independently in Japan [29, 30, 69, 70]. A full-scale test conducted at the cofferdam of Ohkawa Dam (Japan) [Volume = 10 000 m³ (13 080 yd³)] [64, 65] in 1976, and the results of basic research and studies proved the RCD method to be applicable to the dam body. Shimajigawa Dam (Japan) [14, 67], the world's first RCD dam [volume = 317 000 m³ (414 636 yd³)], was completed in 1980, followed by Tamagawa Dam (Japan) [25, 26, 27, 78], the world's largest and highest RCD dam [height = 100 m (328 ft), volume = 1 150 000 m³ (1 504 000 yd³)] in 1987.

In the UK, a comprehensive laboratory investigation and design study were conducted by Price (1977) at the University of Newcastle [54]. Trials with lean concrete which contained fly ash pozzolan were carried out in 1976 at the Tamar Treatment Works in Cornwall, and the results were reported by Dunstan (1977) of the South West Water Authority [19]. Subsequently, Dunstan played a major role in the Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) sponsored research project in 1978-80, which included two large and three small full-scale trials reported in two notes [17, 18]. In these trials, rolled concrete with a

et trois de moindre importance qui firent l'objet de deux rapports [17, 18]. Au cours de ces essais, un béton roulé contenant une faible teneur en ciment et une teneur élevée en cendres volantes fut étudié. Des recherches furent également entreprises sur l'utilisation d'une bétonnière motorisée avec coffrage glissant pour construire le parement d'un barrage. Le point culminant des essais fut la construction d'une petite section de barrage en utilisant des matériaux et une installation de production qui seraient disponibles pour la future construction du barrage Milton Brook, en Grande-Bretagne.

Les travaux de réparation exécutés sur le barrage de Tarbela, au Pakistan, entre 1975 et 1983 [12, 41], sont également des faits importants dans l'évolution historique du béton compacté au rouleau. Au cours de la première utilisation, des granulats de moins de 152 mm et du sable fin furent mélangés, en proportions fixées, à du ciment et à de l'eau en faisant descendre le matériau dans un escalier taillé dans le rocher. Ce matériau a été utilisé pour remplacer le rocher dans les travaux de réfection devenus nécessaires après l'effondrement d'un tunnel. Au cours de ces travaux de réfection qui ont nécessité environ 0,35 million de m³ de matériau, le béton a été compacté par des rouleaux vibrants de 12 tonnes. Le matériau a été transporté de la centrale à béton jusqu'au chantier par des camions de 60 tonnes à déchargement arrière et par des wagons de 110 tonnes à déchargement par-dessous. Le béton compacté au rouleau fut également utilisé pour le revêtement des bassins d'amortissement de l'évacuateur de crue principal (0,9 million m³) et de l'évacuateur auxiliaire (0,94 million m³). Pour ces revêtements, un granulats roulé d'une granulométrie relativement bonne a été séparé en deux tailles : moins de 19 mm, et 19 à 152 mm, puis remélangé en proportions définies avec du ciment et de l'eau. Le malaxage s'est effectué dans des bétonnières rotatives à fonctionnement continu. En plus des utilisations ci-dessus mentionnées, le béton compacté au rouleau fut aussi utilisé pour un batardeau (0,04 million m³), pour le remblai du bassin d'amortissement n° 4 (0,08 million m³) et pour un mur-poids de 56,4 m de hauteur dans la zone de l'usine hydroélectrique (0,13 million m³).

1.3. TECHNIQUE ACTUELLE DANS LE DOMAINE DES BARRAGES

Le nombre de barrages construits en béton par la méthode traditionnelle n'a cessé d'augmenter jusqu'en 1960. En 1930, 33 % de tous les barrages étaient construits en béton, pour 37 % en 1960. Depuis 1960, on a assisté à une nette diminution de ce chiffre. Seuls 23 % environ des barrages construits entre 1961 et 1970 l'ont été en béton. Ceci a surtout été dû au coût relativement plus faible des barrages en remblai. De nos jours, de telles économies résultent en grande partie de la plus grande efficacité dans le transport et le compactage des terres et des enrochements.

La méthode traditionnelle de construction des barrages-poids repose sur le bétonnage d'une série de plots séparés par des joints de contraction (retrait). Cette méthode présente l'avantage d'éviter les fissures d'origine thermique, mais, par contre, le matériel compliqué nécessaire au refroidissement par tuyaux et aux injections des joints la rendent moins économique que la méthode traditionnelle de construction des barrages en remblai. Un autre désavantage des barrages en béton est l'emploi restreint d'équipement lourd employé dans la construction de barrages en remblai à cause du peu de surface disponible sur les chantiers. Par contre, les barrages en remblai ont quelques inconvénients liés à leur structure, par rapport aux

low cement content and a high fly ash content was investigated. A method of using an offset slip-form paver to form the face of a dam was also investigated. The trials culminated in construction of a small section of dam using materials and a production plant which would be available for the future construction of the Milton Brook Dam, UK.

Remedial work on Tarbela Dam, Pakistan [12, 41], during 1975-83 was also significant in the historical development of roller compacted concrete. In the first use, minus 152-mm (6-in) gravel and fine sand were mixed in fixed proportions with cement and water by passing the material down a rock ladder. The material was used to replace rock in the remedial work that was necessary following a tunnel collapse. In this repair work, which required about 0.35 million m³ (0.46 million yd³) of material, the concrete was compacted by 12-ton vibratory rollers. Sixty-ton end-dump trucks and 110-ton bottom-dump wagons were used to transport the material from the mixing plant to the site. Roller compacted concrete was also used for lining the service spillway plunge pool [0.9 million m³ (1.18 million yd³)] and the auxiliary spillway plunge pool [0.94 million m³ (1.23 million yd³)]. For these linings, relatively well-graded river gravel was split into two sizes : minus 19 mm (3/4 in) and 19 to 152 mm (3/4 to 6 in), and then recombined in fixed proportions with cement and water. Mixing was done in continuously operating rotary mixers. Besides the above uses, roller compacted concrete was also used for a cofferdam [0.04 million m³ (0.05 million yd³)], the backfill of Stilling Basin No. 4 [0.08 million m³ (0.11 million yd³)], and for a 56.4 m (185 ft) high gravity wall in the powerhouse area [0.13 million m³ (0.175 million yd³)].

1.3. STATE OF THE ART IN DAMS

Until 1960, the proportion of dams being conventionally constructed of concrete was steadily increasing. In 1930, 33 percent of all dams were constructed of concrete, while in 1960 the figure was 37 percent. Since 1960 there has been a marked decrease; only about 23 percent of dams built between 1961 and 1970 were constructed of concrete. This situation was mainly due to the relatively lower cost possible with embankment dams. Today, such construction cost savings are in large part due to improved efficiency in transporting and compacting earthfill and rockfill.

The conventional method of constructing concrete gravity dams relies on the casting of a series of monoliths divided by contraction joints. The method has the advantage of preventing temperature cracks, but the complicated equipment for pipe cooling and joint grouting makes this method less economical than the conventional embankment dam construction. Another disadvantage of concrete dams is the limitation on use of large machinery, available in embankment dam construction, because of the small construction area. On the other hand, embankment dams have some structural disadvantages when compared with concrete dams. The principal one is the lack of resistance of their materials to overtopping by floods.

barrages en béton, le principal étant le manque de résistance de leurs matériaux aux déversements sur l'ouvrage.

Les barrages en béton compacté au rouleau ont à la fois les avantages de la construction rapide et économique des barrages en remblai et les qualités liées à la structure des barrages en béton. Avec les méthodes BCR et RCD, le béton est mis en place suivant de longues couches ininterrompues et est compacté par des rouleaux vibrants ou par des tracteurs sur chenilles associés à des rouleaux non vibrants, alors que le béton traditionnel est coulé dans des plots monolithiques séparés où il est vibré au moyen de pervibrateurs immergés dans le béton. Les méthodes BCR et RCD se caractérisent par des coûts réduits de main-d'œuvre, une exécution sans discontinuité des travaux, une réduction des durées de construction et des économies en poids de ciment pour le béton. Néanmoins, il faut empêcher la formation des fissures thermiques. Un moyen efficace est celui adopté dans la méthode RCD [47].

Le béton compacté au rouleau suivant la méthode BCR a pour origine différentes techniques : celle de la construction de routes en béton (au Royaume-Uni, par exemple, un type de béton compacté au rouleau est utilisé pour la construction des grandes routes depuis une trentaine d'années), celle des spécialistes en matériaux de construction (ce qui avait été prédit par Raphael (1970) dans son étude intitulée « Le barrage-poids optimal » [56], et celle de l'ingénieur géotechnicien (Lowe - Batardeau de Shihmen et Tarbela).

Ces méthodes prévoient l'utilisation de mélanges très maigres de matériaux consistants, pour réduire le coût du béton et le dégagement de chaleur. La construction, en 1982, du barrage Willow Creek, aux États-Unis, par exemple, est très connue parce qu'elle a permis une économie substantielle, bien qu'il ait été nécessaire ultérieurement d'améliorer l'étanchéité par des injections à cause de fuites à travers le barrage.

A la suite de l'expérience de Willow Creek, un certain nombre d'autres barrages ont été construits, mais tous de conception différente : dans la grande majorité des cas, on a utilisé plus de ciment et tous ces barrages comprenaient des dispositifs pour contrôler les fuites au niveau des joints horizontaux. Ayant profité de cette expérience et de certaines autres, le barrage Upper Stillwater, aux États-Unis, fut conçu avec un béton contenant plus de pâte et étant plus ou moins analogue au béton traditionnel. La différence majeure est que ce béton est mis en place et compacté par des engins de terrassement.

Le choix de la richesse du mélange d'un béton compacté au rouleau devrait être guidé par un facteur économique basé sur les propriétés des matériaux requises dans chaque cas. Néanmoins, bien que les conceptions de Willow Creek et de Upper Stillwater ne soient pas identiques, chacun de ces deux ouvrages apporte une solution à ses propres problèmes de façon économique. Willow Creek est avant tout un barrage qui maîtrise les crues, tandis que la principale fonction de Upper Stillwater est d'être une retenue d'eau en haute montagne.

L'attitude qui domine aux États-Unis quant à l'application de cette nouvelle méthode de construction est que celle-ci permet de la souplesse. On est convaincu que la conception d'un barrage traditionnel peut être positivement modifiée pour tirer les meilleurs avantages techniques et économiques du béton compacté au rouleau : par exemple, en supprimant les joints transversaux ou en adoptant une plus grande distance entre eux, en adaptant les qualités du béton à la nouvelle forme de

Roller compacted concrete dams have many of the advantages of both economical and rapid construction of embankment dams and structural reliability of concrete dams. In the RCC and RCD construction methods, concrete is placed in long and continuous layers and is consolidated by vibrating rollers, or by a combination of crawler tractors with non-vibratory rollers, while conventional concrete is placed in isolated monoliths and consolidated by immersion vibrators. The RCC and RCD methods are characterized by reduced labor costs, continuous construction, shortened construction periods, and cement content savings for the concrete. However, there is a need for ways to prevent temperature cracks in the concrete. One such successful way is that used in the RCD method [47].

The RCC was derived from a concrete road technologist's approach (the UK, for example, has been using a form of roller compacted concrete in highways for nearly 30 years), from a materials engineer's approach (predicted by Raphael (1970) in "The Optimum Gravity Dam" [56]), and from a geotechnical engineer's approach (Lowe - Shihmen Cofferdam and Tarbela).

The approaches envisioned the use of extremely lean mixtures of no-slump material to reduce the cost and the heat generation of the concrete. The construction of Willow Creek Dam (USA) in 1982, for example, is widely known to have permitted a substantial economy, although the watertightness subsequently was improved by grouting because of leakage through the dam.

Following the Willow Creek experience, a number of RCC dams have been built, but with modified designs : most have used more cement and all have had measures to control leakage at the horizontal joints. Benefiting from these and other experiences, Upper Stillwater Dam, USA (1987), was designed to contain concrete having a higher paste content, in some ways similar to conventional concrete. The main difference is that it is placed and compacted with earthmoving equipment.

The choice of the richness of the mixtures in the roller compacted concrete should be one of economics, based on material properties required in each case. Nevertheless, even though the Willow Creek and Upper Stillwater designs are quite different, each dam solves its own problem economically. Willow Creek is primarily a flood control dam, while Upper Stillwater's main function is water storage at a high mountain site.

The attitude prevailing in the USA on the use of this new construction method is one that allows flexibility. The belief is that traditional dam design can be suitably modified to obtain the best technical and economical benefit from the roller compacted concrete : for example, the abolition of transverse joints, or a larger distance between them, the adjustment of concrete performances to the new design concept, and, in some cases, the elimination of the forms for the dam faces. Given

conception, et, dans certains cas, en éliminant les coffrages utilisés pour les parements du barrage. Si on tient compte des avantages de cette méthode, il pourrait y avoir une tendance à la réduction du gros œuvre pour réaliser des économies dans l'exécution des travaux.

Néanmoins, l'expérience acquise aux États-Unis a donné naissance à une technologie avancée qui, tout en respectant le facteur sécurité, n'exclut pas certains changements dans la conception pour adapter les performances du béton aux nécessités de chacun des cas étudiés. Il en résulte que cette technologie peut être appliquée aussi bien aux barrages de faible hauteur et de moindre importance qu'aux barrages plus hauts et plus grands (par exemple, le barrage Upper Stillwater, hauteur : 87 m).

La méthode de construction RCD mise au point au Japon diffère quelque peu de celle utilisée aux États-Unis. La méthode RCD constitue une avancée prudente mais soutenue de la conception traditionnelle du béton de masse et de son emploi, en direction de l'utilisation du béton compacté au rouleau dans un barrage. Comme le font bien d'autres pays, les Japonais considèrent que les barrages en béton compacté au rouleau doivent présenter une sûreté de comportement (c'est-à-dire, résistance, imperméabilité, pérennité et intégrité globale) analogue à celle des barrages en béton traditionnel, et que de telles propriétés ne doivent pas être réduites pour des raisons d'économies de construction [38]. Le RCD est tenu pour être une nouvelle méthode de construction, mais les barrages RCD ne sont pas considérés comme un nouveau type de barrage dont la conception serait différente de la doctrine traditionnelle. Des recherches approfondies ont été faites sur les compositions des mélanges afin d'obtenir une résistance, une imperméabilité et des propriétés quasiment analogues à celles du béton classique, avec une construction plus efficace et plus économique par rapport à ce dernier béton. Des joints de contraction transversaux sont habituellement prévus dans le corps du barrage, ce qui empêche la formation de fissures thermiques. Un mortier est épandu entre les couches pour assurer l'étanchéité du barrage et les surfaces extérieures des barrages RCD sont coffrées et constituées de béton traditionnel, ce qui donne aux barrages une pérennité analogue à celle des barrages en béton classique.

Les économies réalisées dans la construction des barrages RCD suivant cette méthode ne concernent pas seulement la réduction du coût mais également le maintien du bon fonctionnement des barrages-poids traditionnels. La méthode RCD est souple, de sorte qu'elle peut être appliquée à des barrages de n'importe quelle hauteur et destination. A la finition, les barrages RCD ne présentent pas de fissures d'origine thermique, de fuites, ni d'autres défauts de construction.

Le barrage Shimajigawa, terminé en 1980, fut le premier barrage du monde construit en béton compacté au rouleau. Par rapport aux barrages en béton traditionnel, il présentait un béton de même qualité, une économie substantielle ainsi qu'une exécution des travaux plus rapide [14, 67]. Cette expérience a engendré un certain nombre de barrages RCD, comme le grand barrage Tamagawa et deux autres en cours de construction, le barrage Sakaigawa (122 m) et le barrage Miyagase (155 m).

the benefits associated with this approach, there could be a tendency to slight structural aspects for the sake of construction economies.

However, USA experience has led to an advanced technology that, being respectful of safety, does not exclude some design modifications, fitting the concrete performances to the needs of each case under examination. Therefore, it can be applied to both the low-height and less important dams and to high and large dams [e.g., Upper Stillwater Dam, height = 87 m (285 ft)].

In Japan, the RCD method of dam construction using roller compacted concrete has been developed that is somewhat different from that used in the USA. The RCD approach is a cautious but steady movement from traditional mass concrete design and construction to the inclusion of roller compacted concrete in the dam. The Japanese, like many nations, hold that roller compacted concrete dams should have structural reliability (e.g., strength, watertightness, durability, and integrity) similar to that of traditional concrete dams, and that such properties should not be slighted just for the sake of construction economies [38]. RCD is considered a new construction method, but RCD dams are not considered a new type of dam whose design philosophy differs from the conventional design philosophy. Elaborate studies have been made on the design of the mixture proportion so that almost the same strength, watertightness, and other performances as conventional concrete, and higher construction efficiency and economy than conventional concrete, can be obtained. Transverse contraction joints are normally provided in the dam body, which makes the dam free from temperature cracks. Mortar is spread between layers to make the dam watertight, and the outside surfaces of RCD dams are consistently formed and built of conventional concrete, which makes the dams as durable as conventional concrete dams.

The economies of RCD dam construction realized by this approach are considered not only from the point of view of the cost reduction but also with the aim to maintain the structural reliability of conventional gravity dams. The RCD method is flexible so that it can be applied to dams of any height and purpose, and RCD dams are completed free from noticeable temperature cracks, water leakage, and other structural deficiencies.

Shimajigawa Dam was completed in 1980 as the world's first roller compacted concrete dam, proving, in reference to a conventional concrete dam, the same quality of concrete as well as a better economy and speed of dam construction [14, 67]. From this experience have sprung a number of RCD dams, including the large Tamagawa Dam, and two others under construction, Sakaigawa Dam [122 m (400 ft)] and Miyagase Dam [155 m (509 ft)].

2. CONSIDÉRATIONS LIÉES A LA CONCEPTION

2.1. GÉNÉRALITÉS

La construction d'un barrage-poids en béton compacté au rouleau devrait être envisagée sur tout site qui présente une fondation rocheuse convenant à un barrage-poids en béton traditionnel. Ce type de barrage est généralement plus économique dans une vallée relativement large, surtout par rapport à un barrage en remblai qui demande un évacuateur de crue séparé. Les avantages économiques deviennent encore plus attrayants quand le barrage est important et quand il n'y a que peu d'ouvrages encastrés.

2.2. SITE ET AUTRES FACTEURS LOGISTIQUES

Dans la construction des plots d'un barrage en béton traditionnel, les blondins, les grues à flèche ou les tapis transporteurs sont nécessaires pour transporter le béton directement jusqu'aux postes de bétonnage qui sont souvent à des niveaux différents. Dans le procédé de construction en béton compacté au rouleau, tout le matériel de transport est simplifié du fait que le béton est déposé sur une grande surface horizontale, ce qui permet le transport par camions ou par un système mixte de tapis et de camions.

Étant donné que le profil des barrages en béton compacté au rouleau est pratiquement identique à celui de n'importe quel barrage-poids en béton et que le matériel utilisé est analogue à celui employé pour un remblai qui a une section transversale beaucoup plus grande, la crête du barrage peut se trouver engorgée, principalement lorsque les travaux se rapprochent du couronnement. L'emploi d'un tapis pour acheminer le béton peut soulager cette congestion en éliminant les gros engins de transport sur roues au sommet du barrage.

Dans le cas d'un barrage-poids en béton compacté au rouleau, les solutions de dérivation de la rivière sont identiques à celles existant pour un barrage en béton classique, excepté que la solution de laisser un plot à niveau bas pour la dérivation par-dessus l'ouvrage n'est pas possible. Cependant, la réalisation d'une zone abaissée au sommet du BCR pour constituer un seuil déversant, ainsi que cela a été fait au seuil Bucca, Queensland, Australie, peut être facilement pratiquée. Le béton compacté au rouleau est généralement mis en place en couches ininterrompues sur toute la longueur du barrage. Des conduits peuvent être réalisés au travers de l'ouvrage pour assurer la dérivation. Comme pour les autres barrages en béton, ceux construits en béton compacté au rouleau peuvent supporter des déversements sans dommages importants. Cette caractéristique influe sur le batardeau et les ouvrages de dérivation, au même titre que le très court délai d'exécution qui limite l'exposition aux crues importantes. L'utilisation de béton compacté au rouleau s'avérerait

2. PLANNING CONSIDERATIONS

2.1. GENERAL

Construction of a roller compacted concrete gravity dam should be considered at any site which has a rock foundation suitable for a traditional concrete gravity dam. This type of dam is usually most economical in a relatively wide valley, especially in comparison with an embankment dam which requires a separate spillway. The economic advantages become more attractive with increasing scale of the dam and with few embedded facilities.

2.2. SITING AND OTHER LOGISTIC FACTORS

In conventional concrete dam block construction, traveling cableways, jib cranes, or belt conveyors are necessary to transport concrete directly to the placement areas, often at different levels. In roller compacted concrete construction, transporting equipment is greatly simplified because the concrete is placed over a wide horizontal area allowing transportation by trucks or a combination of belts and trucks.

Since the design section of dams constructed of roller compacted concrete is essentially the same as that of any concrete gravity dam and the equipment used is similar to that used on an embankment having a much larger cross section, the top of the concrete dam can become congested, especially as the construction nears the crest. The use of a belt conveyor to transport concrete could relieve some congestion by eliminating the large-wheeled hauling equipment from the top of the dam.

The options for river diversion with a roller compacted concrete gravity dam are similar to those for a conventionally placed concrete dam, except that the option of leaving a single low block for diversion over the structure is not practicable. However, constructing a depressed area in the top of the RCC forming a weir, such as was done at Bucca Weir in Queensland, Australia, can readily be accommodated. Roller compacted concrete is generally placed continuously in layers across the full length of the dam. Conduits can be constructed through the structure for river diversion. As with other concrete dams, roller compacted concrete dams can be overtopped without serious damage. This characteristic influences the cofferdam and diversion requirements, as does the very short construction period which limits exposure to severe flooding. The use of concrete placed by roller compaction probably would be less suitable for structures having unusual structural complications, extensive embedments, or those which are heavily reinforced. Single layers of

certainement inadapté pour des ouvrages de structure compliquée, comportant de nombreux organes encastrés, ou pour ceux qui sont fortement armés. Des couches uniques d'armatures ont été employées avec succès dans du béton compacté au rouleau. Cependant, l'utilisation d'armatures dans un remblai d'essai au barrage Copperfield, Queensland, Australie, a conduit à des essais décevants. Ces expériences satisfaisantes et décevantes soulignent la nécessité de porter une grande attention à l'utilisation d'armatures dans le béton compacté au rouleau.

2.3. FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE DE LA CONSTRUCTION DE BARRAGES EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU

La construction de barrages en béton compacté au rouleau est une opération qui implique une rationalisation de la construction entraînant une révision de la conception et du processus d'exécution des barrages en béton classique. L'économie que l'on peut réaliser avec un barrage en béton compacté au rouleau, et qui est examinée ci-après, est un facteur très important et peut être encore mieux comprise par une étude comparative avec la construction de barrages en béton traditionnel. Le facteur « économie » est important, mais il doit toujours être tempéré par une exigence plus importante en matière de comportement et de durabilité de l'ouvrage.

2.3.1. Réduction de la durée de construction

Le programme de bétonnage doit être fixé en tenant compte des installations de chantier, du nombre d'équipes, du volume du barrage et de la topographie du site.

Le rythme que l'on peut adopter pour mettre en place le béton compacté au rouleau est si rapide que le barrage peut être terminé en un temps considérablement réduit, ce qui non seulement diminue les coûts de construction, mais permet également l'achèvement de l'ouvrage plus tôt. Les économies réalisées en réduisant le délai d'achèvement entraînent la diminution des charges de location des installations de chantier, des coûts des emprunts et des dépenses en main-d'œuvre, en électricité et autres. Un achèvement rapide du barrage peut être un élément positif, surtout lorsque la mise en place du béton doit être interrompue durant l'hiver.

Les avantages qui découlent d'un achèvement anticipé des travaux sont nombreux, en particulier la probabilité d'occurrence de crues pendant les travaux est réduite.

2.3.2. Méthode rationalisée de construction

La construction de barrages en béton compacté au rouleau permet l'utilisation à grande échelle d'engins de chantier traditionnels, tels les dumpers, les bulldozers et les rouleaux vibrants. Lorsque ces engins sont utilisés convenablement, ils peuvent nettement réduire le coût en main-d'œuvre. Leur utilisation non seulement augmente la cadence de transport et de bétonnage, mais également diminue le nombre d'ouvriers qualifiés nécessaire à ces travaux.

Les couches longues et larges mises en œuvre dans la construction des barrages en béton compacté au rouleau permettent d'améliorer les procédés de bétonnage.

reinforcement have been successfully used in roller compacted concrete. However, unsatisfactory results were experienced in the use of reinforcement in a trial fill at Copperfield Dam in Queensland, Australia. These successful and unsuccessful experiences clearly point out the need for careful consideration when using reinforcement with RCC.

2.3. ECONOMICAL FEASIBILITY OF ROLLER COMPACTED CONCRETE DAM CONSTRUCTION

Roller compacted concrete dam construction is a process involving a series of rationalizations of concrete dam construction that includes reviewing both the design and construction process of conventional concrete dams. The economy of roller compacted concrete dam construction, described further in this section, is of great importance and may be better understood through a comparative study with conventional concrete dam construction. Economy is an important factor to be considered, but it must always be tempered by a higher need for adequate structural and durability properties.

2.3.1. Shortening construction period

The proper concrete placing schedule should be determined in consideration of the construction facilities, the number of shifts, the volume of the dam, and the site topography.

The rate of placement possible with concrete by roller compaction is so rapid that the dam can be completed in a considerably shortened construction period, which not only reduces construction costs but also allows earlier completion of the project. The cost savings achieved through shortening the construction period include decreased leasing charges for construction facilities, reduced costs for construction loans, and reduced expenses such as those for labor, electricity, and so on. Rapid construction of the dam is beneficial, especially in cases where concrete placement is forced to be interrupted in the winter season.

The benefits achieved by earlier completion of the project are many. Particularly, the shortened construction period reduces the probability of floods occurring during construction.

2.3.2. Rationalized construction process

Roller compacted concrete dam construction enables the wide use of conventional construction equipment such as dump trucks, bulldozers, and vibrating rollers. Properly used, these could substantially decrease labor costs. The use of such construction equipment not only increases the rate of transporting and placing concrete, but also decreases the number of skilled workers required.

The long, wide layers used in roller compacted concrete dam construction enable concrete placement procedures to be improved. When the need for transverse

Lorsque des joints de construction (retrait) transversaux sont nécessaires, ils peuvent être découpés immédiatement après la mise en place du béton, au moyen de machines spécialement conçues, comme c'est le cas sur les barrages RCD au Japon. Ces machines sont très efficaces et ont peu d'incidence ou aucune incidence sur la rapidité de la construction. La diminution du nombre de coffrages ou leur élimination est également un facteur important en ce qui concerne l'économie d'exécution et le gain de temps.

Pendant longtemps, on a pensé qu'aucun joint longitudinal n'était nécessaire dans les barrages en béton compacté au rouleau, du fait que la construction ininterrompue élimine la formation de fissures longitudinales dues à la température. Néanmoins, l'élimination des joints de contraction transversaux doit être étudiée de façon approfondie en tenant compte de l'expérience acquise sur certains barrages en BCR dans le domaine des fissures transversales d'origine thermique. Dans de nombreux cas, il est également possible d'éliminer le refroidissement par serpentins noyés dans le béton et les injections des joints.

2.3.3. Économie de liant

Les ouvrages en béton compacté au rouleau nécessitent un béton consistant (sans affaissement) pouvant être transporté par dumpers et compacté avec des rouleaux vibrants, des tracteurs sur chenilles, ou des rouleaux de 50 ou 100 tonnes sur pneus, ce qui permet de réduire le dosage en ciment compatible avec l'obtention de la qualité requise au projet. L'utilisation de cendres volantes ou de pouzzolanes à la place d'une partie du ciment permet une réduction supplémentaire du coût.

Un dosage moindre en ciment réduit l'élévation de la température du béton due à la chaleur d'hydratation, ce qui peut éliminer la nécessité de refroidir le béton par circuits noyés, à condition que l'épaisseur de la couche et les intervalles de bétonnage soient contrôlés.

2.3.4. Avantages supplémentaires

Le béton compacté au rouleau est mis en place sous forme de longues et larges couches. Les conditions de sécurité sont améliorées par la réduction des dénivelées entre chaque couche (en général de l'ordre d'une levée). La grande surface de travail horizontale permet les déplacements, en toute sécurité, des ouvriers, des machines et des matériaux, et améliore la communication entre les ouvriers et la transmission des ordres. La diminution des installations de coffrage réduit également tous les risques inhérents à ce genre de travaux dangereux.

Les dumpers, les bulldozers, les rouleaux vibrants et les rouleaux sur pneus sont les principaux engins utilisés dans la construction des barrages en béton compacté au rouleau. Une disponibilité facile de ces engins permet un travail efficace et souple par introduction du nombre voulu d'engins mécaniques dans le programme de construction.

Les blondins utilisés dans la construction des barrages en béton traditionnel demandent généralement de grandes excavations sur chaque rive du barrage; l'absence de ces blondins dans la construction des barrages en béton compacté au rouleau minimise l'impact sur le milieu naturel.

contraction joints is foreseen, they may be cut in the concrete immediately after placement by specially developed joint-cutting machines as is done in Japanese RCD dams. These machines are very effective and have no little or no detrimental effect on the rapid construction. The reduction or elimination of formwork is also an important factor for economical construction and time saving.

It has long been thought that no longitudinal joints were necessary in roller compacted concrete dams because continuous construction eliminates the possibility of longitudinal temperature cracks. However, the elimination of the transverse contraction joints should be carefully studied because of the experience of transverse temperature cracks in some RCC dams. Embedded pipe cooling and in many cases joint grouting can also be eliminated.

2.3.3. Cement materials saving

Roller compacted concrete construction requires no-slump concrete that can be transported by dump trucks and compacted by vibrating rollers, by crawler tractors, or by 50- or 100-ton rubber-tired rollers to enable reduction in the cement content that is consistent with the performance required by the design. Use of fly ash or pozzolans in place of part of the cement allows for further cost reduction.

A reduced cement decreases temperature rise in concrete due to the heat of hydration, which can eliminate the need for embedded pipe cooling of the concrete when accompanied by control of the lift thickness and the intervals of concrete placement.

2.3.4. Additional benefits

Roller compacted concrete is placed in long and wide layers, and the height difference of each layer is minimized (usually only one lift), improving safety conditions. The wide, horizontal working area allows safe movement of workers, machinery, and materials, and improves communication and instruction to the workers. The accompanying reduction in the installation of forms also reduces the risk connected with this hazardous work.

Dump trucks, bulldozers, vibrating rollers, and tire rollers are the primary machines used in roller compacted concrete dam construction. Easy availability of such equipment enables effective and flexible work by introducing the desired numbers of machines according to the construction schedule.

The cableways used in conventional concrete dam construction usually require large excavations at both abutments of the dam. On the contrary, the absence of cableways in roller compacted concrete dam construction minimizes the impact on the natural environment.

3. BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU (BCR)

3.1. CONSIDÉRATIONS ET PARAMÈTRES RELATIFS AU PROJET DE L'OUVRAGE

3.1.1. Généralités

L'utilisation de rouleaux vibrants ou autres pour compacter le béton au lieu de pervibrateurs immergés dans le matériau ne change rien à la conception de base des barrages, des écluses ou de tout autre ouvrage massif. Les procédés de construction sont par contre affectés. C'est la raison pour laquelle, lors de la programmation des travaux, de l'étude de la disposition générale des ouvrages annexes, du traitement des joints, on doit tenir compte de la rapidité des travaux résultant de l'utilisation du BCR. Tout ouvrage massif, de longueur et largeur suffisantes pour permettre l'évolution des rouleaux et des engins d'épandage, peut être bénéfique économiquement.

Tout en tirant avantage de la latitude permise par la construction en BCR, le projeteur de l'ouvrage doit faire preuve de discrétion en équilibrant les réductions de coût face aux exigences techniques. La pérennité et les qualités à long terme requises du barrage BCR sont des éléments techniques qui doivent être pris en considération.

3.1.2. Considérations sur le projet de l'ouvrage

Les ouvrages-poids tels que les barrages [76] sont essentiellement conçus pour résister au renversement et au glissement. La contrainte de compression du béton n'est généralement pas déterminante. Néanmoins, la contrainte de cisaillement le long des surfaces de contact entre les couches de BCR peut être un facteur significatif, surtout dans le cas des barrages de grande hauteur et de ceux présentant des pentes aval raides. La conception des ouvrages-poids est principalement guidée par des considérations de fondation. Il est extrêmement rare que la rupture d'un barrage-poids, dans des conditions de chargement soutenu ou de crues, résulte d'une défaillance initiale de la partie en béton située au-dessus de la fondation rocheuse. Historiquement, les ruptures de barrages en béton ont eu pour cause un glissement ou un cisaillement du rocher de fondation. Il est essentiel de connaître tous les détails concernant la stratification, l'orientation des plans de fracture de la fondation rocheuse et autres éléments. S'il existe un plan potentiel de glissement dans la fondation, il faut alors exécuter des fouilles sous ce plan ou apporter une masse suffisante pour garantir la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. A ce propos l'utilisation du BCR offre deux solutions supplémentaires dans le choix du type de barrage. Si la surface du plan de glissement potentiel est limitée, la partie inférieure du barrage peut être construite pendant les périodes froides, sans joints verticaux, pour faire un pontage dans le plan de faiblesse. Par contre, si la surface est trop large pour le pontage, l'augmentation de masse exigée pour réduire le potentiel de

3. ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC)

3.1. STRUCTURAL DESIGN PARAMETERS AND CONSIDERATIONS

3.1.1. General

The use of vibratory or other rollers to compact concrete in lieu of immersion vibrators does not change the basic design concepts for dams, locks, or other massive structures; however, it does affect construction procedures. Therefore, during construction planning, structural design layout of appurtenant structures, and treatment of joints, the rapid construction that is possible with roller compacted concrete (RCC) should be considered. Any massive structure of sufficient length and width to accommodate the rollers and spreading equipment could be economically benefited.

The designer, in taking advantage of the latitude afforded by RCC construction, must use discretion in balancing cost reductions against technical requirements. The durability and long-term performance requirements of the RCC dam are technical factors to be considered.

3.1.2. Design considerations

Gravity structures such as dams [76] are designed essentially for stability against overturning and sliding. The compressive strength of concrete is generally not a controlling factor. However, shear strength along the interface between RCC layers can be an influencing factor, especially on high dams and those with steep downstream slopes. The design of gravity structures is controlled principally by foundation considerations. Failure of a concrete gravity dam under sustained loading or flood conditions as a result of initial failure in the concrete section above base rock is extremely rare. Historically, the failure mode for concrete dams has been by sliding or shear failure of the foundation rock. Knowledge of bedding, orientation of fracture planes in the base rock, and other pertinent foundation information is essential. If there is a potential plane of sliding within the foundation, the choice is normally either to excavate below the plane or provide sufficient mass to reduce the sliding potential to a safe limit. At this point, the use of RCC offers two additional alternatives in the selection of dam type. If the area of the potential sliding failure plane is limited, the lower portion of the dam can be built during cool weather without vertical joints to provide a bridge across the plane of weakness. If the area is too wide for bridging, the increased mass requirements to reduce sliding potential can be provided by low-cost RCC construction. The cost of the additional mass is offset by the cost advantages of using an integrated spillway system rather than the separate spillway required for an earthfill or rockfill dam.

glissement peut être obtenue à bas prix avec du BCR. Le coût de cette masse supplémentaire est compensé par les avantages résultant de l'utilisation d'un évacuateur de crue intégré plutôt que d'un évacuateur séparé exigé pour les barrages en remblai.

S'il n'existe aucun plan de rupture potentielle dans le rocher de fondation, le projeteur prête alors une attention particulière aux propriétés du béton de l'ouvrage et à la préparation de la fondation pour le bétonnage. Un rocher propre et légèrement rugueux est essentiel pour lier le béton au rocher et pour minimiser ou éliminer toute fuite.

Les barrages-poids BCR, comme les barrages en béton traditionnel, sont généralement calculés comme des ouvrages à deux dimensions en utilisant des méthodes de calcul de contraintes dans un plan, basées sur la théorie des plots rigides ou sur la méthode des éléments finis. Il est possible, cependant, de faire des calculs à trois dimensions pour l'étude des barrages-poids rectilignes. Ils seront réalisés pour le projet des ouvrages arqués. Normalement, le parement amont est vertical sur toute sa hauteur ou du moins sur une grande partie de celle-ci; un parement amont incliné peut être prévu près de la base pour améliorer la stabilité ou la résistance au renversement. Le parement aval, qui présente des fruits variant de 0,6/1,0 à 0,8/1,0 (H/V) ou même encore moins raides, coupe généralement le parement amont en un point proche du couronnement. A la partie supérieure du barrage qui présente une épaisseur de 4,5 à 9,0 m, le parement aval est généralement vertical et intersecte le parement incliné. A l'intersection, un engraissement peut être ajouté pour lisser la forme du parement du barrage et réduire la probabilité de concentration des contraintes qui sont engendrées par une surcharge due aux crues ou aux séismes. Dans les zones fortement sismiques, le parement aval du barrage présentera une pente constante du sommet jusqu'à la base, pour éliminer totalement les concentrations de contraintes. Cette même pente constante pourra également simplifier les travaux de construction. Pour compenser l'augmentation de volume qui en découle, la pente aval peut être réduite sans pour autant changer la stabilité de façon substantielle.

3.1.3. Stabilité au glissement

Comme c'est le cas pour les barrages en béton classique, la résistance au glissement dans la partie en béton dépend de la résistance au cisaillement du béton (cohésion), du coefficient de frottement interne et de la force normale moyenne sur le plan de rupture potentielle. Au cours des années passées, les valeurs de la résistance au cisaillement du béton ont été bien définies par rapport à la résistance à la compression, dans le cadre du projet des barrages-poids. Le présent document ne cherche pas à élargir la discussion sur ce sujet. En prenant pour base l'expérience acquise à ce jour, la résistance au cisaillement non confinée du BCR a varié de 16 à 39 % de sa résistance à la compression, les rapports les plus élevés correspondant aux résistances à la compression les plus basses. Néanmoins, la résistance au cisaillement le long des surfaces de contact entre les couches de BCR sera plus faible que celle du béton de masse sauf si des précautions particulières sont prises, par exemple : limitation du temps séparant le bétonnage des couches successives, mise en place d'un lit de mortier entre les couches, nettoyage des joints, et/ou augmentation du dosage en pâte dans les mélanges BCR. Dans le cas de BCR à faible dosage en pâte et lorsque les précautions citées plus haut n'auront pas été prises, il se peut que certaines couches n'aient pas une cohésion suffisante. Dans ce cas, il faudra

If there are no potential failure planes in the foundation rock, then the design normally gives particular attention to the concrete properties of the section and to foundation preparation for concrete placement. Clean rock with some roughness is essential for bonding of concrete to rock and for minimizing or eliminating leakage.

Gravity dams built of RCC, like dams built of conventional concrete, are generally analyzed as two-dimensional structures using conventional plane stress analytical procedures based on rigid block or finite element methods. However, three-dimensional analyses can be used for design of straight gravity dams and should be used for designing curved structures. The upstream face is normally vertical for the entire height or for a significant part; an upstream batter near the base may be added to improve stability or resistance against overturning. The downstream face, at slopes varying between 0.6 : 1.0 and 0.8 : 1.0 (horizontal to vertical), or flatter, usually intersects the upstream face at a point near the crest. The downstream face, from a crest thickness of 4.5 to 9.0 m (15 to 30 ft), generally drops vertically to intersect with the slope. A fillet can be added at the intersection to smooth out the face, reducing the probability of stress concentrations developing during overloading such as caused by floods or earthquakes. In highly seismic areas, to fully eliminate stress concentrations, the downstream face should be a constant slope from crest to base. This same constant slope will also simplify construction. To mitigate the subsequent increase in volume, the downstream slope can be reduced without substantial change in stability.

3.1.3. Sliding stability

As in a conventional concrete gravity dam, resistance to sliding within the concrete section is dependent upon the cohesive shear strength (cohesion), the coefficient of internal friction in the concrete, and the average normal force on the potential failure plane. Accepted values of shear strengths of concrete, as related to the compressive strength to be used in the design of gravity dams, have been established over the years. This document does not attempt to provide a detailed discussion of that subject. Based on experience to date, the unconfined shear strength of RCC has varied from 16 to 39 percent of its compressive strength, with higher ratios occurring at lower compressive strengths. However, the shear strength along the interface between RCC layers will be less than that through the RCC mass unless special precautions are taken, such as limiting exposure time between layers, placing a bedding mix between layers, cleaning the joints, and/or increasing the paste content within the RCC mix. For low paste RCC mixtures and where the special precautions noted above are not taken, cohesion may not be achieved on every lift. In this case consideration should be given to a design based on assuming no cohesion and relying only on friction accompanied by a lower factor of safety. Designers may wish to consider the economics of using zero cohesion in their

envisager un projet basé sur l'hypothèse de l'absence de cohésion et ne tenir compte que du frottement, avec un coefficient de sécurité plus bas. Les projeteurs peuvent souhaiter examiner l'économie résultant de l'adoption d'une cohésion nulle dans leurs projets et d'un traitement réduit des joints horizontaux. Dans les études préliminaires, une valeur de 0,5 MPa et un coefficient de frottement de 1,0 sont des chiffres prudents. Ils peuvent être augmentés si les informations spécifiques au site indiquent des coefficients de frottement plus élevés résultant de granulats de haute qualité, et ils peuvent être diminués dans le cas de granulats de mauvaise qualité, tels que le granite altéré ou le grès faible. Les valeurs effectives adoptées dans les calculs définitifs devront être basées sur des essais des matériaux à utiliser ou sur une extrapolation attentive des essais pratiqués sur des mélanges de BCR provenant d'autres chantiers et contenant la même proportion de granulats et de liant. En définitive, comme pour tout projet de barrage, le projeteur du barrage BCR doit être certain que les hypothèses prennent en compte de façon réaliste les matériaux définitifs et que les propriétés mécaniques sont obtenues dans le cas particulier en question.

3.1.4. Stabilité au renversement

Les méthodes de calcul de la stabilité au renversement des barrages BCR sont analogues à celles adoptées pour les ouvrages en béton traditionnel. Il faut prendre en considération les matériaux utilisés et le poids unitaire correspondant du béton en place, ainsi que le profil transversal adopté; comme pour les calculs de stabilité au glissement, la stabilité de chaque levée doit être examinée, en particulier s'il n'y a pas de béton imperméable à l'amont, ce qui rend possible l'existence de sous-pressions au sein même du barrage. La mise en place de drains ayant une pérennité et une efficacité garanties est un facteur très important. Si la pérennité et l'efficacité ne peuvent être garanties, il faudra alors adopter des hypothèses prudentes de sous-pression.

Le BCR se prête bien à la variation de la largeur de la base de l'ouvrage et de la forme du profil, permettant d'obtenir la stabilité nécessaire. Par exemple, la pente du parement aval peut ainsi facilement être adoucie ou raidie pour obtenir la stabilité.

Certaines de ces considérations spécifiques mises à part, les techniques de calcul mises en œuvre lors du projet de barrages-poids en béton traditionnel peuvent être appliquées aux barrages en BCR.

3.1.5. Variations de température et de volume

Dans les barrages BCR, les variations internes de volume sont fonction du refroidissement du béton et du niveau de confinement. Les surfaces extérieures sont également affectées par le retrait dû au séchage. L'abaissement de température est la différence entre la température sans contrainte, définie comme la température à laquelle aucune contrainte ne se développe dans le béton par suite de cette température, et la température moyenne interne en exploitation compte tenu des variations cycliques externes. La température correspondant à l'absence de contrainte est, pour sa part, une fonction du confinement; c'est-à-dire que sans confinement les changements de volume n'ont pas d'influence néfaste sur le béton de masse dans la mesure où il ne se produit aucune contrainte. Néanmoins, étant donné l'absence de joints verticaux, ceci ne saurait être le cas sur des barrages BCR

designs and requiring reduced standards for the horizontal joints. For initial planning and design purposes, a value of 0.5 MPa (70 lb/in²) with a friction factor of 1.0 is prudent. This may be increased if site-specific information indicates higher friction factors derived from high-quality aggregate, and could be decreased for poor aggregate such as weathered granite or friable sandstone. Actual values used in final designs should be based on tests of the materials to be used or careful extrapolation from tests on RCC mixtures from other projects with similar aggregates and cementitious materials content. Finally, as with any dam design, the designer of RCC must be sure that the assumptions are realistically integrated with the final materials and structural properties achieved with the particular construction.

3.1.4. Stability against overturning

Approaches to stability analysis against overturning for RCC dams are similar to those used for conventional concrete structures. Consideration must be given to the materials used and the subsequent unit weight of the in-place concrete, along with the adopted cross section. As in sliding stability analyses, stability of any lift must be reviewed, in particular if no impervious upstream concrete is used, thereby allowing the potential for uplift along lift lines within the dam. Placement of drains and ensured lifetime effectiveness of those drains are critical considerations to be addressed. If lifetime effectiveness and continued efficiency cannot be ensured, then appropriate conservative uplift assumptions need to be made.

Design and construction practices with RCC lend themselves to the option of varying the base width and cross-sectional shape to achieve the required stability design values. For example, the downstream face of a dam can easily be flattened or steepened as required to satisfy the stability analysis.

Except for a few of these special considerations, analytical design techniques used for conventional concrete gravity dam design are also applicable for RCC dam design.

3.1.5. Thermal and volume changes

In RCC dams, the internal volume change is a function of the temperature drop and degree of restraint. Exposed surfaces are affected by drying shrinkage also. Temperature drop is the difference between the stress-free temperature, defined as that temperature at which no stresses are developed in the concrete as a result of such temperature, and the average internal operational temperature with appropriate allowances for external cyclic variations. Stress-free temperature is, in turn, a function of the internal and external restraint; that is, without restraint, thermal and attendant volume changes are not detrimental to the mass concrete in that no stress is developed. However, because of the lack of vertical joints, this is not the case in RCC dams, and the stress-free temperature is therefore assumed to be about equal to the peak temperature. Tatro and Schrader [68] have discussed procedures

et il est donc considéré que la température ne créant aucune contrainte est quasiment la température de pointe. Tatro et Schrader [68] ont étudié les moyens de déterminer de façon précise l'augmentation de température interne et son effet dans des ouvrages en BCR, ainsi que les niveaux de contrainte correspondants.

Le projeteur dispose de plusieurs moyens pour minimiser les contraintes d'origine thermique. Ceux-ci comprennent : le remplacement d'une partie du ciment par des pouzzolanes ; le choix de la saison de bétonnage et de son rythme ; l'isolation, la création de joints, l'épaississement du profil en travers du barrage, permettant d'utiliser un béton moins résistant contenant moins de ciment et donc avec des températures de pointe moins élevées. Lorsque la possibilité se présente, le choix d'un granulats ayant un plus faible coefficient de dilatation peut être utile. En règle générale, le concassage augmentera la résistance à la fissuration ou la capacité de déformation, mais cela n'est pas toujours vrai. L'utilisation de glace pour réduire la température initiale du mélange n'a que peu d'intérêt pour le BCR parce que la quantité d'eau utilisée est faible et que le temps supplémentaire de malaxage requis pour faire fondre la glace puis mélanger l'eau pourrait ralentir la production de façon significative. Néanmoins, la production de granulats pendant l'hiver et leur stockage en vue de leur utilisation au début du printemps peut être un avantage lorsque les variations saisonnières sont importantes.

Le rythme rapide du bétonnage inhérent aux ouvrages en BCR (environ 300 mm, ou plus, par jour) peut influencer la dissipation de la chaleur en limitant le refroidissement naturel aux parements et en ne permettant pas une dissipation verticale importante au travers de la surface de la dernière levée comme cela se produirait si une exposition plus longue était possible. Réciproquement, le rayonnement solaire peut augmenter la température du béton en chauffant la surface horizontale de la levée. Cela peut être limité en arrosant les levées en vue de refroidir le béton par évaporation. Dans certains cas, l'augmentation de la température interne, résultant du fait que le matériau a été mis en place trop rapidement pour que la chaleur puisse se dissiper, est plus que compensée par la limitation simultanée de la durée d'exposition de chaque couche au soleil ; il en résulte qu'une mise en place plus rapide conduit à une température interne globalement plus faible.

Dans le BCR, la vitesse de refroidissement n'est pas uniforme suivant les trois directions orthogonales. Au départ, la dissipation de la chaleur devrait se produire dans la direction amont-aval et localiser les gradients thermiques les plus accentués près des parements du barrage. Ces gradients peuvent être assez importants pour engendrer la fissuration et/ou la séparation des couches de BCR. Chaque cas doit être étudié au vu des conditions locales de climat, de construction et de matériaux.

Comme indiqué précédemment, le confinement, qui est l'autre facteur important pour que se produisent des contraintes par suite d'un changement de volume, est causé par les fondations rigides s'opposant au retrait thermique des couches inférieures. Un confinement se produit également entre la partie supérieure du barrage qui est plus froide et la masse plus épaisse et plus chaude de la partie inférieure, ou encore entre le cœur plus chaud et les parements plus froids. Si la différence de raideur et la baisse de température sont suffisantes, le béton a tendance à se fissurer. Plusieurs conditions peuvent atténuer cette tendance : (1) une résistance élevée à la traction et un faible « coefficient de contrainte » du BCR (les contraintes dues aux retraits thermiques non libres sont fonction du module, du fluage et du coefficient de dilatation du BCR), (2) l'ouverture de fissures ou joints dans la fondation empêchant la fissuration verticale transversale du béton et réduisant le

for accurately determining the internal thermal rise and behavior in RCC structures and the corresponding stress levels.

The designer has a variety of options available to minimize thermal stresses. These include substituting pozzolan for some of the cement; controlling the time of year when placement is allowed and the rate of placement; and insulating, jointing, and increasing the dam cross section so that lower strength concrete with less cement can be used, thereby lowering peak temperatures. When a choice is available, selecting an aggregate with the lowest coefficient of expansion will help. In general, crushing will improve crack resistance or strain capacity, but this has not always been successful. The use of ice to reduce the initial mixture temperature has limited value in RCC because the amount of water used is low and because the additional mixing time required to melt the ice and then mix the water could significantly slow production. However, producing aggregate during the winter and stockpiling it cold for use in early spring can be beneficial where seasonal changes are significant.

The rapid rate of placement inherent in RCC construction, about 300 mm (1 ft) or more per day, may impact heat dissipation by limiting natural cooling to the faces and not permitting significant vertical dissipation through the last lift surface as would occur if longer exposure were possible. Conversely, solar radiation can raise the concrete temperature by heating the flat horizontal lift surface. This can be limited by wetting the lifts in order to cool the concrete by evaporation. In some cases the increase in internal temperature occurring because material was placed too rapidly for the heat to dissipate is more than offset by simultaneously limiting the time each lift is exposed to the sun; that is, faster placing results in an overall lower internal peak temperature.

A nonuniform rate of cooling occurs in RCC in all three orthogonal directions at unequal rates. Initially, heat dissipation, which should occur in the upstream/downstream direction, also should cause the steepest thermal gradients near the faces. These gradients can be large enough to cause cracking and/or to separate layers of RCC. Each situation must be analyzed for its own climatic, construction, and material conditions.

As mentioned in the preceding paragraph, restraint, the other major factor producing stress from volume change, occurs because of the rigid foundations and the thermal shrinkage of the lower lifts. Restraint also occurs between the cooler upper part of the dam and the thicker warmer mass of the lower part, or between the warmer central core and the cooler faces. If the differential stiffness and temperature drop are sufficient, the tendency is for the concrete to crack. Several conditions may soften this tendency : (1) a high tensile strength and low “ stress coefficient ” of the RCC (the stress related to restrained temperature changes — a function of its modulus, creep, and coefficient of expansion), (2) foundation fractures or joints opening outside the faces, precluding vertical transverse cracking in the concrete and reducing the number of cracks in the longitudinal direction, or (3) strategically directed transverse cracks which are analogous to contraction joints

nombre de fissures dans le sens longitudinal, (3) les fissures d'orientation transversale et analogues aux joints de contraction dans les barrages en béton traditionnel qui n'affecteront pas directement la stabilité de l'ouvrage.

De nombreuses méthodes de calcul bi-dimensionnel sont à la disposition du projeteur pour obtenir une bonne estimation de la répartition des températures et des contraintes dans l'ensemble de l'ouvrage. Les calculs approfondis devront tenir compte de la chaleur d'hydratation, des conditions climatiques, des propriétés du matériau et de certaines conditions de mise en place. La chaleur d'hydratation est déduite de l'augmentation de température adiabatique fonction du temps (Fig. 1) et mesurée sur des échantillons de béton en laboratoire. L'air ambiant et le rayonnement solaire dépendent du site ou peuvent être estimés à partir d'enregistrements météorologiques. Les caractéristiques de fluage, le coefficient de dilatation thermique, la conductibilité, la chaleur spécifique, le poids spécifique et la diffusivité dépendent également du béton et sont obtenus à partir de mesures faites en laboratoire. La température de bétonnage, la vitesse de bétonnage ainsi que la période de l'année où il est entrepris sont des paramètres qui doivent être déterminés par calcul.

Les écarts par rapport aux températures calculées peuvent être contrôlés au moyen de thermocouples ou de thermistors installés au cours des travaux de construction. Les données peuvent être enregistrées automatiquement au moyen d'un matériel électronique ou encore manuellement à une fréquence préétablie. Un dispositif type pour un barrage important peut comporter trois ou quatre plans verticaux de sept appareils chacun judicieusement espacés, aux niveaux supérieur, moyen et inférieur. Dans chaque série de sept, un élément doit être situé au centre du plot et les autres à proximité des parements de sorte que le gradient thermique puisse être correctement déterminé. A partir des mesures faites sur le chantier au cours des travaux, il est possible de définir un modèle plus correct de l'état thermique et de prévoir les contraintes de façon plus précise. Les Fig. 2-A à 2-D et 3-A à 3-D montrent des variations thermiques réelles qui se sont produites dans le barrage Willow Creek pendant une période de 18 mois après l'achèvement de l'ouvrage.

Au cours de son exploitation, l'ouvrage continuera à être soumis à des variations thermiques et volumétriques qui auront tendance à se régulariser ou à osciller autour d'une température stable. La retenue isolera le parement amont des variations de température de l'air ambiant de plus forte amplitude. Les retenues qui ont une profondeur supérieure à 30 m varient chaque année de 3 °C dans la moitié inférieure (par exemple, de 7 °C à 10 °C). Il en résultera un gradient thermique plus modéré dans l'épaisseur, produisant ainsi moins de perturbation dans l'ouvrage.

L'importance du problème de la fissuration dans un ouvrage en BCR sera, dans la plupart des cas, appréciée en considérant la fonction de l'ouvrage et l'impact public, en particulier dans le cas où une telle fissuration produit des fuites importantes provenant d'un ouvrage dont le but est de retenir l'eau. L'expérience acquise sur le barrage Copperfield, Australie, et sur d'autres ouvrages montre qu'il y a auto-colmatage des fissures fines par calcification et qu'en général de telles fissures ne posent pas de problèmes à long terme.

3.1.6. Joints de contraction

Les fonctions principales des joints de contraction (de retrait) sont de maîtriser les effets de confinement causés par les fondations et les appuis, et de permettre le

in conventional concrete dams and, consequently, will not directly affect the structural stability.

For a designer, numerous two-dimensional analytical methods are available to provide a good estimate of the temperature and stress distribution throughout the structure. Comprehensive analyses will include the heat of hydration, climatic conditions, material properties, and certain placement conditions. The heat of hydration is described with the adiabatic temperature rise varying with time, shown on Fig. 1, and measured from laboratory mixtures. Ambient air and solar radiation are site-dependent or may be estimated from weather records. Creep values, coefficient of thermal expansion, conductivity, specific heat, unit weight, and diffusivity also depend on the mixture and are obtained from laboratory measurements. Placement temperature, rate of placement, and time of year to initiate placement are parameters to be determined from the analysis.

Confirmation of or variation from the computed temperatures can be determined from thermocouples or thermistors installed during construction. Data may be recorded automatically with electronic equipment or manually at a predetermined frequency. A typical pattern for a larger dam may consist of three or four judiciously spaced vertical planes of seven instruments each, at the upper, middle, and lower elevations. Within each set of seven, one should be located at the block centerline and the others spaced near the faces so that the thermal gradient can be correctly plotted. From field measurements during construction, a more correct temperature model can be defined and stresses predicted more accurately. Fig. 2-A through 2-D and 3-A through 3-D show actual thermal variations which occurred in Willow Creek Dam over an 18-month period following completion of construction.

During operation, the structure will continually undergo thermal and volumetric changes which will tend to normalize or oscillate around a stable temperature. The reservoir will act to insulate the upstream face from the higher amplitude ambient air temperatures. Reservoirs over 30 m (100 ft) deep may vary annually in the lower half by 3 °C (5 °F); for example, 7 °C to 10 °C (45 °F to 50 °F). Consequently, a more moderate thermal gradient will exist through the thickness, producing less structural distress.

The degree of concern over cracking in an RCC structure in most cases should be based on the function of the facility and the public impact in the event that cracking results in significant leakage from a water-control structure. Experience at Copperfield Dam, Australia, and other dams is that self-healing of smaller cracks occurs through calcification and such cracks may not pose long-term problems.

3.1.6. Contraction joints

The principal functions of contraction joint spacing are to control the effects of foundation and abutment restraint and to allow contraction of the concrete to occur

retrait du béton sans provoquer la fissuration du barrage. Les principaux problèmes soulevés par la fissuration sur les barrages BCR comme sur d'autres barrages-poids sont l'aspect extérieur, la pérennité et la maîtrise des fuites. L'espacement des fissures qui s'étendent sur toute la hauteur et toute l'épaisseur d'un barrage et résultent du confinement par les fondations est directement lié à une variation de température, à la période au cours de laquelle elle se produit, à la résistance à la traction du béton à l'époque en question, au coefficient de contrainte du béton au cours de la période en question. Les variations thermiques qui affectent l'ensemble d'un barrage dépendent de nombreux facteurs mais principalement des conditions ambiantes, de la progression des travaux et des dimensions et forme du barrage. Les variations de température sont nettement plus rapides en surface (voir la Fig. 5.35 du Comité 207 de l'ACI, Réf. 2). La fissuration en surface est généralement due au confinement par le béton interne plutôt qu'à celui causé par les fondations et est donc limitée en profondeur. Le confinement par les fondations peut contribuer à la fissuration en surface sur un barrage construit sans joints de contraction; toutefois, la propagation des fissures de surface diminue le confinement par le béton interne, de telle sorte qu'il n'y aura propagation ultérieure que si le volume continue à diminuer. Dans la plupart des cas, les variations critiques de volume dans les parties basses de l'ouvrage peuvent être empêchées par le bétonnage par temps froid et par l'utilisation d'un béton à faible chaleur d'hydratation. Lorsque la mise en place aura lieu par temps chaud ou très chaud, il faudra prendre des mesures supplémentaires pour empêcher la fissuration et, dans certaines conditions, il sera impossible d'éviter les variations critiques de volume.

Le barrage Alpe Gera a été construit en Italie sans joints de contraction coffrés [23]. Cet ouvrage ne différait des barrages en BCR munis de joints que par la méthode de compactage du béton. Le béton était transporté et déposé par des camions-dumpers, étalé par des bulldozers et compacté par des pervibrateurs montés sur tracteurs. Le béton présentait un faible taux d'affaissement. Les joints de contraction ont été découpés environ 12 heures après la consolidation du béton, au moyen de lames vibrantes montées sur un tracteur. Des joints analogues ont été prévus pour le barrage Elk Creek aux États-Unis. Pour éviter la propagation de fissures incontrôlées à partir de la surface supérieure, il n'est pas nécessaire d'adopter un espacement entre de tels joints plus serré que la hauteur moyenne du barrage au-dessus des fondations [1].

Des études consacrées au dégagement de chaleur et à l'augmentation de température dans des éléments massifs en BCR montrent que le bétonnage par couches successives et continues peut avoir un effet bénéfique : la distribution uniforme de la température dans la masse limite la fissuration. La cadence moyenne de bétonnage peut avoir un effet encore plus significatif sur l'augmentation maximale de la température que la hauteur des couches.

Les joints de contraction, caractéristiques de la conception des barrages en béton traditionnel, ne sont pas, en règle générale, spécifiés pour la plupart des barrages BCR construits ou projetés jusqu'à ce jour, sauf en ce qui concerne le barrage Elk Creek aux États-Unis. La doctrine la plus couramment adoptée est que la mise en place du BCR peut s'accompagner d'une dissipation de chaleur ne provoquant que de faibles variations de volume lorsque le matériau est caractérisé par un faible dosage en eau et en ciment, d'où une plus faible nécessité de joints de contraction. De plus, la moindre saturation et le meilleur contact des granulats entre eux, par rapport au béton classique, diminuent le fluage. Cela peut être

without cracking in the dam. The principal concerns caused by cracking in RCC and other gravity dams are appearance, durability, and leakage control. The spacing of cracks extending the full height and thickness of a dam as a result of foundation restraint is directly related to a change in temperature, the time period over which it occurs, the tensile strength of the concrete at the time in question, and the stress coefficient of the concrete over the time period in question. Thermal changes throughout a dam are complicated by many factors but are principally affected by ambient conditions, construction sequence, and size and shape of the dam. The rate of thermal change is significantly greater at the surfaces (See Figure 5.35 of ACI Committee 207, Ref. 2.). Surface cracking is generally caused by internal restraint rather than foundation restraint and is therefore limited in depth. Foundation restraint can contribute to surface cracking in a dam built without contraction joints; however, the propagation of surface cracks relieves the internal restraint condition, thus requiring a continuing decrease in volume for further propagation. In most instances, the critical volume change in the lower portions of the structure can be prevented by cold weather placement and use of low heat-generating concrete. When placement is done in warm or hot weather, added measures are required to prevent cracking, and, under some conditions, developing the critical volume change may not be preventable.

Alpe Gera Dam was constructed in Italy without formed contraction joints [23]. The construction differed from jointed RCC construction only in the method used for compacting concrete. Concrete was transported and deposited in dump trucks, spread with bulldozers, and compacted by means of tractor-mounted internal vibrators. The concrete was of low-slump consistency. Contraction joints were cut approximately 12 hours after consolidation by means of vibrating blades mounted on a tractor. Similar joints have been specified for Elk Creek Dam in the USA. To prevent the propagation of uncontrolled cracks from the upper surface, such cut joints need not be spaced closer than the average height of the dam above the foundation [1].

Studies of the heat generation and temperature rise of massive RCC placements indicate that the uniform sequential placement of lifts may have a beneficial effect on crack reduction due to the uniform temperature distribution throughout the mass. The average placement rate can have a more significant effect on maximum temperature rise than the height of lift.

Frequently placed contraction joints, a product of conventional concrete dam design, have not generally been specified for most RCC dams constructed or planned at this time, except in the case of Elk Creek Dam, USA. Current design philosophy is that in the RCC placing scheme heat dissipation can occur, which, when coupled with the low water and cement content, results in low volume changes and hence less need for contraction joints. In addition, the lesser degree of saturation and the increased aggregate to aggregate contact compared to conventional concrete foster lower creep values. This might be similar to that expected by use of a gap-graded aggregate.

identique à ce qui est attendu de l'utilisation de granulats à granulométrie discontinue.

3.1.7. Joints de reprise

Des joints de reprise horizontaux peuvent être envisagés ou non. Lorsqu'une levée n'a pas encore été recouverte avant la prise initiale, un joint sec se forme entre les deux couches. Le temps requis pour la formation d'un joint sec dépend des conditions climatiques, de la quantité de ciment Portland dans le béton, du type et des caractéristiques de prise du ciment, ainsi que de l'utilisation d'adjuvants. Il peut y avoir avantage à utiliser des adjuvants retardateurs de prise, qui permettent de faire face à des retards imprévus et d'agrandir la surface de travail de la levée.

Le traitement des joints horizontaux de reprise ou de construction est différent de celui utilisé pour le béton de masse classique dans la mesure où il n'y a pas de ressuage durant la prise, donc pas de film de laitance à faible caractéristique mécanique à la surface. Le ressuage est le résultat d'un tassement durant la prise lorsque l'eau en excès se sépare du mélange et est déplacée vers la surface par les matériaux plus lourds. Le ressuage ne se produit pas dans un BCR convenablement dosé. Néanmoins, lors de la consolidation du BCR, une certaine quantité de pâte peut être ramenée à la surface. Si la cure du béton est convenable, il n'est pas nécessaire d'enlever cette pâte avant la pose d'une couche suivante.

Si le joint de reprise a été maintenu propre et humide pendant toute son exposition à l'air, un traitement n'est généralement pas indispensable. Si la surface a été contaminée par des saletés, de la boue ou tout autre élément étranger, le traitement prescrit devra inclure l'enlèvement des corps étrangers. La pratique courante australienne permet à la surface de sécher pendant une heure avant de la nettoyer au jet d'air pour enlever complètement les débris. Dans le cas où la surface s'est complètement asséchée et/ou un joint sec s'est formé, elle sera complètement nettoyée et il pourra être nécessaire de mettre en place un mélange spécial si la liaison avec la couche suivante est exigée. L'importance de la couche de liaison à mettre en place dépend du degré d'étanchéité requis et de la résistance au cisaillement nécessaire à la stabilité à cet endroit. Au barrage Elk Creek, États-Unis, un mortier de liaison au sable, de 6 à 12 mm d'épaisseur, fut utilisé sur chaque levée de 0,6 m d'épaisseur. Néanmoins, il faut aussi noter que plusieurs barrages BCR ont été construits avec succès sans couche de liaison.

Plusieurs matériaux de liaison ont été utilisés, étudiés et évalués. Il est impossible de dire lequel est le meilleur, vraisemblablement parce que les différents matériaux sont adaptés aux diverses techniques de construction, aux dosages du BCR et aux différents environnements. Par contre, il y a accord pour considérer que la couche de liaison est indispensable pour assurer l'étanchéité et une adhérence améliorée (traction et cisaillement) après l'apparition d'un joint sec. Des coefficients marginaux de sécurité au glissement qui existent parfois dans les sections supérieures d'un barrage peuvent être améliorés quand on utilise des matériaux de liaison convenablement conçus et appliqués.

Lorsqu'on doit utiliser un matériau de liaison, l'USBR et l'US Army Corps of Engineers (États-Unis) adoptent un béton riche en pâte, plus humide que l'optimum, avec des granulats inférieurs à 19 mm. L'USBR se base sur les expériences faites au barrage Upper Stillwater, aux États-Unis, où le BCR était caractérisé par une plus

3.1.7. Lift joints

Horizontal construction joints may be either planned or unplanned. When a placement layer has not been covered by the time it reaches initial set, a cold joint is formed between the two layers. The time required for a cold joint to form depends on climatic conditions, the amount of portland cement in the mixture, the type and set time characteristics of the cement, and the use of admixtures. There may be an advantage in using set-retarding admixtures, presumably extending the set and working time, providing flexibility against unscheduled delays, and allowing enlargement of the working surface of the lift.

Treatment of horizontal lift or construction joints differs from that of conventionally placed mass concrete in that there is no surface water gain during set of the concrete. Thus, there is no weak laitance film at the surface. Surface water gain (bleeding) is the result of subsidence during set when the excess water separates from the mixture and is displaced to the surface by the heavier materials. Bleeding does not occur in properly proportioned RCC. However, in full consolidation of RCC, paste may be brought to the surface. If properly cured, this paste does not have to be removed prior to placement of a subsequent layer.

If the construction joint has been kept clean and moist throughout its exposure, joint treatment is generally not required. If the surface has been contaminated by dirt, mud, or other foreign elements, the prescribed treatment should require removal of the foreign matter. Current Australian practice permits the surface to dry for up to 1 hour prior to cleaning with air jets to assure full removal of debris. If the surface has been allowed to dry completely and/or a cold joint has developed, it should be thoroughly cleaned and may require a special bedding mixture if bonding to the subsequent layer is desired. The extent of bedding depends on the degree of watertightness required and the shear resistance needed for stability at that location. At Elk Creek Dam, USA, a 6- to 12-mm (1/4- to 1/2-in) thick sanded bedding mortar was used on every 0.6-m (2-ft) lift. It should also be noted, however, that several RCC dams have been successfully constructed without the use of a bedding mixture.

Various bedding mixtures have been used, studied, and evaluated. There is no concurrence on what is best, probably because different bedding mixtures are suited to different construction techniques, RCC mixture proportions, and environments. There is concurrence that bedding is necessary to provide watertightness and improved bond (tensile and shear) after a cold joint develops. Marginal factors of safety against sliding that sometimes exist in the upper reaches of a dam may be improved when properly designed and applied bedding mixtures are employed.

When a bedding mixture is to be used, the US Bureau of Reclamation (USBR) and the US Army Corps of Engineers (Corps) have used a wetter-than-optimum, paste-rich concrete mixture with a maximum size of aggregate equal to or less than 19 mm (3/4 in). The USBR's concept was based on experiments using higher

grande résistance, des granulats plus petits et une teneur relativement élevée en pâte. La même attitude a été adoptée par le Corps lors de la construction du barrage Willow Creek, aux États-Unis; elle reposait aussi sur des résultats de planches d'essais. Néanmoins, au barrage Willow Creek, cette technique ne devait, en fait, apporter que peu d'avantages et a donné naissance à des problèmes d'ordre pratique au niveau du malaxage et du bétonnage.

L'épaisseur de la couche de liaison sera identique à la taille maximale des granulats du béton. Les carottes de vérification ont toujours montré que cette méthode assurait une liaison complète entre les couches de BCR. Le matériau de liaison se fond dans le BCR sans laisser apparaître de lit de mortier ou de liaison qui puisse être clairement individualisé.

La couche de BCR est mise en place sur la couche de liaison pendant que celle-ci conserve son « slump » ou sa maniabilité, puis le compactage fait pénétrer le BCR dans la couche de liaison. Si celle-ci est trop mince, la liaison peut se trouver réduite. Si elle est trop épaisse, elle modifiera les dosages de la couche de BCR se trouvant au-dessus et aura un effet néfaste sur le compactage convenable du mélange au rouleau. Cela peut conduire à une diminution des densités, accompagnée d'une réduction de résistance.

3.1.8. Galeries et tunnels d'accès

Les galeries et tunnels d'accès des barrages BCR remplissent à peu près le même rôle que ceux des barrages en béton traditionnel. Par exemple, une galerie de fondation servira à la fois d'accès à l'intérieur du barrage pour y procéder à des inspections, de collecteur de fuites, d'accès aux appareils de mesures et autres matériels, de point d'aboutissement des drains forés depuis la crête de l'ouvrage. La conception des galeries en BCR est du même ordre que pour les barrages en béton classique. Le paradoxe est que le fait d'inclure des galeries dans des barrages BCR va à l'encontre de l'efficacité et de la simplicité du bétonnage et du compactage. C'est la raison pour laquelle les projeteurs de barrages BCR aimeraient ne pas inclure de galeries, surtout dans des barrages de faible hauteur où leur utilité est discutable.

Les méthodes de construction de galeries dans les barrages BCR font l'objet du paragraphe 3.3.5.2.

3.1.9. Maîtrise des percolations

Les percolations au travers d'un barrage en béton posent des problèmes aux projeteurs. Elles peuvent produire des sous-pressions tout à fait indésirables à l'intérieur du barrage si le drainage n'est pas adéquat. Diverses méthodes de maîtrise des percolations ont été utilisées parmi lesquelles : l'utilisation d'une membrane étanche sur le parement amont [28], d'un masque en béton traditionnel, d'une couche de liaison spéciale entre les couches près du parement amont, la mise en place de drains verticaux internes, le surdimensionnement du barrage pour assurer une stabilité vis-à-vis d'une sous-pression de 100 %, ou encore le nettoyage spécial de la surface de la couche avant de mettre en place la couche suivante de BCR enrichi.

Au barrage Winchester, aux États-Unis, une feuille de PVC, de 1,7 mm d'épaisseur, a été fixée sur la face aval des panneaux de revêtement définitif en béton préfabriqué. Une couche de béton traditionnel, d'une largeur de 460 mm, a ensuite

strength, smaller aggregate RCC with a relatively high paste content in the mass of the Upper Stillwater project, USA. The same approach was used by the Corps during construction of Willow Creek Dam, USA, again based on test sections and experiments. However, at Willow Creek Dam the technique provided little benefit and developed practical problems from the mixing and placing standpoints.

The bedding thickness should be the same dimension as the maximum size aggregate particle in the mixture. Cores have consistently shown that this procedure thoroughly bonds the RCC layers. The bedding mixture blends into the RCC and does not leave a layer of mortar or bedding that is clearly defined.

The RCC layer is spread over the bedding while the bedding retains its slump or workability, and the RCC is then compacted into the bedding. If the bedding is too thin, bonding may be lessened. If the bedding is too thick, it will change the proportions of the RCC layer above and adversely impact the ability of the roller to compact the mixture properly. This may result in reduced densities, with attendant strength decreases.

3.1.8. Galleries and adits

Galleries and adits serve about the same purposes in RCC dams as they do in conventional concrete dams. For example, a single foundation gallery will serve as access to the interior of the dam for inspections, a collector of seepage, access for instrumentation and other equipment, and a terminal point for drain holes drilled from the crest. Design requirements for RCC galleries and adits are commensurate with those of conventional concrete dams. The paradox is that the inclusion of galleries in RCC dams interferes with clean, efficient placement and compaction of RCC. For that reason, designers of RCC dams would like to omit galleries and adits, especially in low dams where the need for them may be questionable.

Construction methods for galleries in RCC dams are discussed in Section 3.3.5.2.

3.1.9. Seepage controls

Seepage through a concrete dam produces concerns for the designer. Seepage may result in undesirable uplift pressures within the dam if the drainage is not adequate. Various methods of seepage control have been used. They include : using a waterproof membrane at the upstream face [28], using a conventional concrete facing, using a special bedding mixture between the layers near the upstream face, providing internal vertical drains, overbuilding the dam to provide stability against 100-percent uplift, or performing special lift surface cleanup before placing the next lift of enriched RCC.

At Winchester Dam, USA, a 1.7 mm (0.065 in) thick polyvinyl chloride (PVC) sheet liner was attached on the downstream side of the leave-in-place precast concrete facing panels. A 460 mm (1.5 ft) wide layer of conventional concrete was

été coulée entre le panneau revêtu de la membrane et le BCR. La membrane a été fixée à l'intérieur des fondations en la faisant passer sous le barrage le long d'une couche de BCR et en la fixant dans une tranchée-parafouille en BCR dans la fondation. Avec ce dispositif, aucune percolation n'a été constatée.

La mise en place d'une zone non armée, en béton traditionnel, sur le parement amont pour assurer l'étanchéité n'a pas toujours été couronnée de succès. La tendance de cette zone à se fissurer à cause du retrait ou de la baisse de la température a rendu cette zone peu efficace pour constituer l'écran principal d'étanchéité sur le barrage Galesville, aux États-Unis [49]. Au barrage Middle Fork, le masque en béton traditionnel, de 300 mm d'épaisseur, a été considéré comme un écran efficace contre les infiltrations.

Une double couche de matériau élastomère projeté sur le parement du barrage Galesville comme mesure secondaire de maîtrise des percolations avait été estimée d'une extensibilité suffisante pour suivre le mouvement des fissures éventuelles. Néanmoins, le matériau n'a pas pu chevaucher les fissures qui se sont formées.

Les parements obtenus avec des coffrages glissants au barrage Upper Stillwater ne sont pas destinés à constituer une barrière contre l'eau [50]. Par contre, la plasticité du béton doit pouvoir fournir, une fois celui-ci convenablement compacté, un joint étanche assurant une bonne liaison entre couches.

Les percolations internes sont généralement collectées par des drains verticaux situés près du parement amont. Ces drains sont coffrés durant la construction, ou forés pendant ou après celle-ci. Au barrage Galesville, des trous d'un diamètre de 76 mm, situés tous les 3 mètres, ont été forés au travers des galeries jusque dans les fondations, à des profondeurs variables. Ces drains conduisent les eaux d'infiltration, tels des entonnoirs, jusque dans les galeries de fondation où l'écoulement se poursuit par gravité jusqu'à un point d'évacuation situé sur le parement aval. Si aucune maîtrise des percolations internes n'est exercée, des sous-pressions peuvent prendre naissance dans le temps, réduisant la contrainte verticale effective nécessaire à la stabilité, ainsi qu'il a déjà été mentionné dans le présent Bulletin. La maîtrise interne est la deuxième ligne de défense contre les infiltrations.

3.1.10. Appareils d'auscultation

Des appareils d'auscultation seront installés en des endroits spécialement choisis dans l'ensemble du barrage et de ses fondations, afin de pouvoir contrôler le comportement de l'ouvrage durant sa construction et son exploitation ultérieure. Le recueil d'informations permettant de vérifier la sécurité de l'ouvrage est d'une importance primordiale. Un deuxième objectif est l'exploitation des informations obtenues en vue d'améliorer la conception des futurs barrages BCR. Ces deux utilisations prennent une importance accrue du fait que les barrages BCR deviennent de plus en plus hauts et volumineux. Le nombre, le type et l'emplacement des appareils installés durant la construction des barrages BCR deviennent des éléments extrêmement importants dans la mesure où ils peuvent diminuer la rapidité du bétonnage et, par voie de conséquence, augmenter les coûts de construction. Une vue très claire de l'objectif du projet est nécessaire à l'ingénieur pour concevoir un ensemble d'appareils et leur implantation, peu onéreux mais bien adaptés à la fourniture de données sur les comportements du barrage et de sa fondation à court et long termes.

then placed between the membrane-faced panel and the RCC. The liner was tied into the foundation by wrapping it under the dam along an RCC layer and tying it into an RCC cutoff trench in the foundation. No seepage has been noticed through this system.

Placing an unreinforced zone of conventional concrete on the upstream face to provide watertightness has had varying degrees of success. The tendency of this zone to crack from shrinkage or temperature drop rendered this zone ineffective as the primary watertight barrier at Galesville Dam, USA [49]. At Middle Fork Dam, the 300 mm (1 ft) thick conventional concrete face was considered to be an effective seepage barrier.

A two-layer elastomeric material sprayed on the face of Galesville Dam as a secondary seepage control measure was thought to have sufficient elongation to stretch over any cracks that may have formed. The material, however, failed to span the cracks which occurred.

The slip-formed faces at Upper Stillwater Dam are not required to function as a water barrier [50]. Instead, the plasticity of the mixture when properly compacted is expected to provide a well-bonded, watertight joint.

Internal seepage is generally contained by vertical holes located near the upstream face, either formed during construction or drilled during or after construction. At Galesville Dam, 76 mm (3 in) diameter holes on 3 m (10 ft) centers were drilled through the galleries into the foundation to varying depths. These drains funnel seepage into foundation galleries where the flow continues by gravity to some discharge point on the downstream face. Without internal seepage control, uplift pressures may build with time, reducing the effective vertical pressure necessary for stability, as has already been discussed. Internal control is the second line of defence against seepage.

3.1.10. Instrumentation

Instruments should be installed at selected locations throughout the dam and its foundation so that measurements can be taken to monitor the structure's behavior during construction and subsequent operation. Of primary importance is the gathering of information by which the structural safety can be determined. Of secondary importance is the use of the information obtained to provide better criteria for designing future RCC dams. This use becomes more important as RCC dams become higher and larger. The number, type, and location of instruments installed during construction of RCC dams become extremely important in that they may hamper rapid placement, thereby increasing construction costs. The designer, with a clear understanding of the project's purpose, can design an inexpensive but functional instrument package and layout to provide immediate and long-range dam and foundation behavioral data.

Les appareils d'auscultation des barrages BCR sont identiques à ceux des barrages-poids en béton classique. Des appareils noyés dans le béton peuvent être utilisés pour déterminer les températures, les déformations, les contraintes, les pressions interstitielles et pour mesurer les fissures [53, tableau 78]. Ces appareils peuvent être du type Carlson à résistance ou du type à corde vibrante, qui tous deux nécessitent un circuit électrique. Des thermocouples installés dans la masse du béton durant la construction, avec une distribution prévue d'avance, mesureront en permanence les températures pendant et après les travaux de construction. Des fissuromètres destinés à détecter les fissures seront également installés à tous les points où il y a un changement important de profil en travers. Les dispositifs de mesures extérieurs impliquent des méthodes topographiques très précises, comme par exemple la « Mesure Électronique de Distance ». Des mesures par collimation sur la crête du barrage, immédiatement après sa construction et fréquemment durant les 5 premières années d'exploitation de la retenue, permettent de suivre l'évolution de l'interaction entre le barrage, la fondation et la retenue. Des réseaux de triangulation peuvent également être installés pour évaluer les déplacements planimétriques et altimétriques d'ensemble du barrage sous les influences prépondérantes de la retenue, de la température et de la fondation.

Pour évaluer l'effet des variations de charge sur la fondation, des appareils mesurant leurs déformations seront installés peu de temps avant le début des travaux de construction. Des déversoirs judicieusement placés dans le caniveau de la galerie de fondation fourniront des informations sur le volume des percolations et sur les variations de débit. Des débits anormaux peuvent traduire des désordres graves dans le barrage ou dans la fondation. La présence de sédiments dans le caniveau peut indiquer un phénomène d'érosion dans le barrage ou dans sa fondation. Des analyses chimiques périodiques des eaux de percolation donneront des indications sur la dissolution des matériaux. La sous-pression dans la fondation, qui est un facteur essentiel dans la stabilité d'un barrage BCR, devra être mesurée à une fréquence fixée par les projeteurs. Les câbles électriques peuvent être posés durant les travaux de construction dans de petites tranchées creusées au moment où le béton est encore jeune ou en forant des trous après durcissement.

Comme pour les barrages en béton classique, les appareils utilisés sur les barrages BCR doivent être bien entretenus et relevés à intervalles réguliers pendant une longue période après la fin des travaux, pour que l'on puisse enregistrer l'évolution du comportement de l'ouvrage. La présentation des mesures sur des graphiques en fonction du temps montrera rapidement le maintien d'un état satisfaisant ou des évolutions anormales qui impliqueront une surveillance attentive. Une dérive soudaine ou accélérée par rapport aux cycles normaux annuels entraînera une recherche immédiate destinée à déterminer si les mesures ont été effectuées correctement, si les appareils ont besoin d'être révisés ou si une anomalie dans le comportement de l'ouvrage est apparue, ce qui doit être signalé immédiatement au Maître d'ouvrage.

3.1.11. Fondations

Comme pour un barrage classique, la conception d'un barrage BCR comprend une interprétation correcte de la géologie qui influe sur la stabilité et la déformation du rocher de fondation. Les barrages BCR doivent être considérés comme des structures tri-dimensionnelles capables de s'adapter à la résistance et aux faiblesses

Instrumentation used in RCC dams is similar to that used in conventional concrete gravity dams. Embedded instruments can be used to determine temperature, strain, stress, and hydrostatic pore pressure, and to measure cracks [53, plate 78]. These may be the Carlson elastic wire type or the vibrating wire type, both of which require electrical circuitry. Thermocouples installed in the mass concrete during construction in a predetermined grid will provide continuous temperature data during and after construction. Wherever there is a substantial change in mass cross sections, crack detection meters should be installed as well. External methods of determining information involve precise surveying methods such as can be achieved with electronic distance-measurement (EDM). By performing collimation readings along the crest immediately after construction and frequently for the first 5 years of reservoir operation, a behavioral history is recorded of the interaction among the dam, foundation, and reservoir. Triangulation networks can be established to develop the overall three-dimensional deformation of the dam from the major influences of reservoir, temperature, and foundation.

To establish base data for the unloading and loading of the foundation, instruments to measure foundation deformation should be installed shortly before construction begins. Judiciously placed weirs in the foundation gallery gutter will supply information on the volume of seepage and changes in flow rates. Abnormal flows may indicate serious conditions in the dam or foundation. Sediment in the gutter may indicate material erosion in the dam or foundation. Periodic chemical analyses of seepage will indicate dissolution of materials. Uplift in the foundation, essential to stability of the RCC dam, should be measured at a frequency set by the designers. Electric cable embedments can be accomplished during construction by excavating small trenches while the concrete is green or by drilling holes after the concrete has hardened.

As regularly done for conventional concrete dams, instruments associated with RCC dams should be maintained and read at prescribed intervals for an extended period of time after construction to create a structural behavior historical record. Data reduction in the form of measurement versus time plots will quickly show continued acceptable performance or trends suggesting careful monitoring. Sudden or accelerated departure from the annual cyclic plots will require immediate attention to determine if the readings were made correctly, the instruments needed maintenance, or a structural anomaly has occurred about which the owner should be alerted.

3.1.11. Foundation

Structural design of the dam, again as in a conventional dam, includes correct interpretation of geology as it will affect stability and deformation of foundation rock. RCC dams are to be considered three-dimensional structures capable of responding to foundation strengths and weaknesses. Consequently, two-dimensio-

des fondations. Par conséquent, des calculs uniquement bi-dimensionnels des percolations et de la stabilité ne peuvent définir de façon précise la résistance globale aux charges appliquées. Des calculs bi-dimensionnels ne peuvent prendre en compte les variations possibles du module d'élasticité d'un point à l'autre de la fondation, susceptibles d'entraîner une surcharge de certaines parties du barrage et/ou de la fondation. Ceci peut ou non être acceptable. Chaque projet de construction devra être apprécié en tenant compte des conditions spécifiques au site. Des irrégularités dans la forme de la fondation, telles celles visibles sur une coupe transversale d'un canyon, peuvent engendrer un transfert de charge des zones déprimées vers les zones d'intrusion et provoquer des variations de contraintes et de déformations par rapport à celles obtenues avec des calculs en déformation plane. De telles variations peuvent ou non être importantes.

Le traitement des fondations par injections est généralement lié aux caractéristiques de site spécifiques à chaque projet. Si un programme complet d'injections est nécessaire, il correspondra généralement au schéma suivant : (1) injections normales de consolidation au pas de 3 ou 6 m dans la zone de contact, sur 6 à 15 m de profondeur, en tenant compte des résultats des études géotechniques; (2) injections pour création d'un voile profond, au pas de 3 m ou moins, à faible distance de l'axe du barrage et parallèle à celui-ci. Ces dernières injections peuvent être exécutées à partir de la galerie de fondation lorsque l'ouvrage a atteint une certaine hauteur assurant une charge suffisante pour empêcher tout soulèvement du béton. Les injections peuvent également être effectuées au moyen de trous inclinés forés depuis le pied amont pendant que les opérations de mise en place du BCR se poursuivent au-dessus. Pour certains ouvrages en BCR, cette méthode s'est révélée être commode, efficace et économique en temps de travail.

Des drains seront forés à l'aval de l'écran d'injection s'ils sont indispensables à la stabilité ou à la maîtrise des percolations. En règle générale, ces drains ont un diamètre d'environ 76 mm et sont forés à un pas de 3 m depuis la galerie ou le parement aval après exécution des injections de fondation. Les profondeurs peuvent varier de 20 à 40 % de la profondeur de la retenue. Les espacements, la profondeur et l'orientation dépendent des conditions propres au site.

Un traitement des fondations, de type « carie dentaire », utilisant un béton classique, peut devenir nécessaire si les fouilles définitives ont mis à jour des failles, des veines, ou un rocher de mauvaise qualité descendant à des profondeurs telles qu'il devient impossible de se débarrasser totalement de ces zones [74, 76] ou de les remplir de béton. Dans la majorité des cas, il s'est avéré que l'emploi du BCR était préférable dans toutes les zones où il était possible de le mettre en place et de le compacter, en réduisant au minimum la quantité de béton dit « dental ». Un autre procédé consiste à utiliser le béton dit « dental » et le béton de remplissage en grandes quantités afin de former une zone nivelée à partir de laquelle est mis en place le BCR.

3.1.12. Évacuateurs de crue

Il est de pratique courante sur les barrages BCR de prévoir un évacuateur de crue à profil en forme de doucine, dans l'alignement du lit du cours d'eau, et non vanné. Lorsque le niveau de la retenue dépasse celui de la crête de l'évacuateur, les eaux descendent librement le long du parement du barrage. Le parement aval présente ou non des formes particulières selon son importance et sa fonction. Les

nal seepage and stability analyses may not accurately define the total resistance to the applied loads. If only two-dimensional analyses are made, significantly different foundation deformation moduli of elasticity across the site may cause portions of the dam and/or foundation to be more severely overloaded. This may or may not be acceptable or desirable. Each project should be evaluated on a site-specific basis. Foundation shape irregularities such as would be seen in a cross-canyon profile could result in load transfer from depressed areas to intrusive areas, again causing variations in stresses and deflections computed from plane strain analyses. Such variations may or may not be significant.

Foundation grout treatment ordinarily would be developed based on the site-specific needs of each project. Where a complete grouting program is necessary, it will normally be similar to the following : (1) standard consolidation grouting at 3- or 6-m (10- or 20-ft) centers across the excavation contact area to 6- to 15-m (20- to 50-ft) depths as determined from the geotechnical analyses; and (2) deep curtain grouting at 3 m (10 ft) centers, or less, near and parallel to the dam axis. Curtain grouting can be performed from the foundation gallery after the structure has reached an elevation so that there is sufficient weight to prevent upward movement of the concrete. Grouting can also be done using angled holes drilled from the upstream heel while the RCC placements continue above. This approach has proven to be convenient, effective, and a " time saver " on some RCC projects.

If needed for stability or seepage control, drain holes should be drilled downstream of the grout curtain. Typically, they are about 76 mm (3 in) in diameter, drilled on 3 m (10 ft) centers from the gallery or downstream face after the foundation grouting has been completed. Generally, depths may vary from 20 to 40 percent of the reservoir depth. Actual spacing, depth, and orientation are dependent on site conditions.

Foundation or so-called " dental " treatment consisting of conventional concrete placements may be required if final excavation has uncovered faults, seams, or shattered or inferior rock extending to such depths that it is impractical to remove the areas entirely [74, 76] or to fill them with dental concrete. Most projects have found the use of RCC desirable in any area where it can be placed and compacted, with dental concrete kept to a minimum. Another approach has been to use dental concrete and mass backfill concrete extensively to create a level zone from which to begin placing RCC.

3.1.12. Spillways

Current practice in RCC dams is to design an ogee spillway aligned with the streambed and uncontrolled; that is, no gates are added to the crest for control. When the reservoir elevation exceeds that of the spillway crest, the discharge flows unencumbered down the face of the dam. The downstream face is either formed or unformed depending upon volume and usage. Faces may consist of conventional

parements peuvent être en béton classique formant des marches qui ont pour but de dissiper progressivement l'énergie de l'écoulement et d'assurer une résistance à l'érosion. Cette conception a été adoptée sur les barrages Upper Stillwater et Monksville, aux États-Unis, et sur les barrages De Mist Kraal et Zaaihoek, en Afrique du Sud, alors que les évacuateurs des barrages japonais, par exemple le barrage Tamagawa, ont des surfaces inclinées lisses.

Les parois qui ne sont pas coffrées présentent l'aspect rugueux du BCR. La crête en forme de doucine peut être obtenue au moyen d'un coffrage, après mise en place du BCR, avec du béton classique ou du béton projeté. Le BCR sans consistance ou non compacté est enlevé pour que le béton de forme puisse être mis en place sur une surface saine, comme cela a été réalisé sur les barrages Willow Creek et Galesville aux États-Unis.

Une autre conception d'évacuateur de crue a été adoptée pour le barrage Middle Fork aux États-Unis. L'évacuateur principal et les ouvrages de restitution sont rassemblés dans une tour à double chambre placée contre le parement amont et raccordée à l'ouvrage de contrôle situé au pied aval de l'ouvrage par l'intermédiaire de conduites situées en tranchée dans la section principale [51]. Les conduites ont été exécutées avant la mise en place du BCR, pour éviter toute interférence avec sa mise en œuvre.

3.1.13. Ouvrages de vidange et de restitution

Il est de pratique courante, lors du choix des ouvrages de vidange et de restitution dans les projets en BCR, de situer les conduits dans ou le long de la fondation rocheuse pour minimiser les retards dans la mise en place du BCR [20, 50, 51, 62].

Les conduits sont généralement fabriqués en béton traditionnel avant de commencer la mise en place du BCR. L'emplacement de l'ouvrage de prise à l'amont du barrage, et du local de contrôle et du dissipateur d'énergie à l'aval du pied aval, réduit également les interférences avec la mise en place du BCR.

3.2. MATÉRIAUX ET DOSAGES

3.2.1. Généralités

Le BCR nécessite un mélange qui ne se tassera pas de façon excessive sous l'effet d'un rouleau vibrant ou autre, mais qui aura une granulométrie et un volume de pâte pour qu'une consolidation satisfaisante se fasse sous le rouleau.

Les matériaux et les méthodes de dosage utilisés pour le BCR vont des granulats tout-venant, ayant subi un minimum de traitement, avec faible dosage en liant (ciment plus pouzzolane), jusqu'aux granulats fortement traités, avec une teneur en liant modérée à importante. Au barrage de Tarbela (Pakistan), on a utilisé 3 500 000 m³ de BCR comprenant du gravier de rivière (jusqu'à 150 mm), criblé et mélangé en proportions fixes, avec adjonction de silt. Le béton du barrage Upper Stillwater (États-Unis) [15] présentait un D max. de 50 mm et un dosage de 245 kg/m³ de liant. Pour le barrage Willow Creek (États-Unis), on a utilisé un mélange de roche de carrière et de silt superficiel, avec un minimum de traitement et sans lavage. La dimension maximale des granulats était de 76 mm. Les granulats étaient stockés

concrete formed as steps which are designed to dissipate the flows progressively and provide erosion resistance. This design was used at Upper Stillwater and Monksville Dams, USA, and at De Mist Kraal and Zaaihoek Dams, South Africa, whereas Japanese dams, such as Tamagawa, were designed with smooth, sloping spillway flow surfaces.

Unformed faces have the rough, textured appearance of the RCC placement. The ogee crest can be effectively shaped by forming after RCC placement with conventional concrete or shotcrete. Loose or uncompacted RCC is removed to provide a sound surface for the shaping concrete, as at Willow Creek and Galesville Dams, USA.

Another spillway concept was designed at Middle Fork Dam, USA. The primary spillway and outlet works are combined in a double-chambered tower placed against the upstream face and connected to conduits in a trench at the maximum section leading to the control structure at the toe [51]. The conduits were constructed before RCC placement, thus avoiding interference with RCC placing operations.

3.1.13. Outlet works

Current practice in placement of outlet works in RCC design is to locate the conduits in or along the rock foundation to minimize delays in RCC placement [20, 50, 51, 62].

Conduits are usually constructed of conventional concrete prior to initiating RCC placement. Locating the intake structure upstream of the dam and control house and the energy dissipator downstream of the toe also minimizes interference with RCC placement.

3.2. MATERIALS AND MIXTURE PROPORTIONING

3.2.1. General

Roller compacted concrete (RCC) requires a mixture that will not subside excessively under the weight of a vibratory or other roller but which will have an appropriate grading and paste volume to consolidate adequately under the roller.

Materials and mixture proportioning methods for RCC have ranged from pit-run, minimally processed aggregates with low cementitious materials (cement plus pozzolan) content to fully processed concrete aggregates with moderate to high cementitious materials content. At Tarbela Dam, Pakistan, 3 500 000 m³ (4 578 000 yd³) of RCC with river gravel up to 150 mm (6 in) maximum size, screened and recombined in fixed proportions and with some silt added, was used. The mixture proportioned for Upper Stillwater Dam, USA [15], used 50 mm (2-in) MSA and 245 kg/m³ (415 lb/yd³) cementitious materials. Mixtures at Willow Creek Dam, USA, used a combination of quarried rock and natural silty overburden with minimal processing and no washings. The maximum aggregate size was 76 mm (3 in),

en trois tas (sans tas de sable séparé). Des matériaux et des procédés analogues à ceux du barrage Willow Creek ont été utilisés sur beaucoup d'autres barrages BCR. Sur certains, il y avait deux tas, sans séparation des sables, et au barrage Copperfield (Australie) on a utilisé un seul tas de granulats pour l'ensemble des matériaux.

En parallèle avec les différents procédés de traitement des granulats et de disposition des stockages, diverses méthodes de dosage ont été mises au point. On distingue trois approches selon le principe de base choisi : théorie, analyse en laboratoire, ou pratique.

Les critères de base qui guident la définition de la composition d'un BCR sont les suivants : choix d'une granulométrie propre à minimiser la ségrégation, dosage en eau favorisant le compactage, dosage minimal en liant garantissant les caractéristiques mécaniques requises.

Le choix des matériaux et le dosage des BCR peuvent également être influencés par la liaison entre couches requise aux joints de reprise, l'étanchéité, le risque de fissuration thermique et la pérennité.

Les ouvrages présentant un parement aval plus raide et une masse moins importante nécessiteront un béton plus résistant et donc des contrôles plus sévères en matière de qualité et de production, par rapport aux barrages plus massifs à section plus confortable. De même, les barrages plus élevés auront des zones qui demanderont une résistance mécanique plus importante. La composition du BCR doit être définie par tous moyens utiles en vue d'assurer la résistance, les autres caractéristiques mécaniques et la marge de sécurité nécessaire pour répondre aux critères de stabilité et de bon comportement établis en fonction de la spécificité du site.

Par exemple, la différence principale entre les BCR des barrages Upper Stillwater et Willow Creek concerne la quantité de pâte mise en œuvre. Les deux approches ont leurs avantages et sont toutes deux décrites dans le présent paragraphe.

Le BCR a la consistance « sans affaissement » et est rendu dense par le poids appliqué par le rouleau. En fait, il est plus « compacté » que « consolidé » [71, 77]. Cela demande un dosage en eau beaucoup plus faible que le béton traditionnel de résistance égale, ce qui lui permet de supporter les engins d'épandage et de compactage. Les méthodes de dosage reflètent la recherche d'une consistance différente de celle des bétons plus fluides. Le compactage du BCR et son influence sur la composition (teneur en eau, rapport eau/ciment, etc.) ont été étudiés par Schrader [61].

Un problème important est le risque de liaison imparfaite des différentes couches entre elles. Le faible affaissement du BCR, en particulier de celui contenant des granulats supérieurs à 38 mm, et la faible teneur en pâte engendrent un problème lorsqu'il s'agit de lier un béton frais et un béton déjà durci. Ce problème a été résolu en réduisant l'intervalle de temps entre la mise en place des couches (surtout pour les mélanges plus pauvres en ciment), en traitant la surface de reprise (par exemple, application de couche de mortier ou de liaison) ou en augmentant la teneur en pâte du mélange. La réduction de la ségrégation durant le transport et la mise en place est essentielle pour éliminer les nids de cailloux au contact entre couches. On peut aussi concevoir le profil en travers du barrage de telle sorte qu'aucune adhérence ne soit requise sur les joints de reprise.

and three size groups of stockpiles (without a separate sandpile) were used. Many of the remaining RCC dams have used materials and processing similar to those of Willow Creek Dam. Some have had two primary stockpiles with no separate sand material, and Copperfield Dam, Australia, used a single " all-inclusive " aggregate pile.

Along with the various approaches to aggregate processing and stockpile controls, various approaches to mixture proportioning have evolved. They differ primarily in the emphasis on theory, laboratory analysis, and practicability.

The basic considerations for selecting and proportioning of RCC mixtures are gradation to minimize the possibility of segregation, desired water content for compaction, and minimum amount of cementitious material for the mechanical properties required.

Materials selection and proportioning of RCC mixtures also may be influenced by required bond strength of joints, permeability and seepage control, thermal cracking potential, and durability requirements.

Projects which have steeper downstream slopes and smaller mass will typically require higher strength and hence more vigorous quality and production controls than dams designed with more massive, conservative sections. Similarly, higher dams will typically have zones requiring higher strength. The mixture must be proportioned by whatever means necessary to provide the strength, other material properties, and appropriate overdesign factors to meet all design requirements for stability and performance on a site-specific basis.

The primary difference between the mixture proportioning approach used at Upper Stillwater Dam and the approach used at Willow Creek Dam, for example, is the need to provide excess paste. Both approaches have merits and are described in this chapter.

RCC has a " no slump " consistency and is densified by external loading of the roller. It is therefore " compacted " rather than " consolidated " [71, 77]. This requires much lower water content than for comparable-strength conventionally placed concrete and provides the ability to support compaction or spreading equipment. Mixture proportioning procedures reflect the need for a consistency that is different from slumpable mixtures. Compaction of RCC and its relation to mixture proportions, water, and water/cement (w/c) ratio have been discussed by Schrader [61].

A major concern in RCC design is the potential for incomplete bonding of the layers. The low slump consistency of RCC, particularly that containing aggregates larger than 38 mm (1-1/2 in), and low paste content create a problem in bonding fresh to hardened concrete. This problem has been accommodated by reducing the time interval between lift placement (especially for leaner mixtures), by providing supplemental joint treatment such as mortar or bedding layers, or by increasing the paste content of the mixture. Reducing segregation during transportation and placement is essential to eliminate rock pockets at the joint interface. Alternatively, the dam cross section can be designed so that no bond strength is required across lift joints.

L'absence d'une limite supérieure bien définie quant à la consistance du BCR pose des problèmes de liaison des couches fraîches, quand la pâte ne lubrifie pas les particules de granulats, quand la pâte est insuffisante pour remplir les vides entre granulats ou lorsque les imperfections de la granulométrie ou des techniques de mise en place produisent la ségrégation. Un ensemble différent de circonstances peut exister si un béton à granulométrie discontinue est utilisé.

3.2.2. Maniabilité

Le béton destiné à être compacté au rouleau vibrant est très différent d'aspect, dans son état non consolidé, du béton traditionnel dont l'affaissement peut être mesuré. En effet, il y a peu ou pas de preuve visuelle de la présence de pâte liquide dans le BCR lors de la mise en place. Le BCR se consolide jusqu'à la densité maximale sous un effort de compactage suffisant; néanmoins, l'énergie requise est beaucoup plus importante que celle nécessaire à un béton ayant un affaissement mesurable. Tout procédé de compactage appliqué à l'extérieur, permettant de compacter à fond le béton, peut être utilisé.

Un appareil Vebe modifié, avec un pot de dimension standard, a été parfois utilisé pour définir la consistance nécessaire au bon compactage (la consistance est obtenue par variation de la teneur en pâte et/ou en eau). Il comporte un moule vibrant cylindrique et rigide, une plaque d'acier raide permettant l'application d'une charge sur chaque couche. La teneur en eau pour laquelle on voit la pâte monter à la surface autour de la plaque de charge après une durée de vibration donnée est considérée comme satisfaisante pour les travaux de construction. Par exemple, au barrage Upper Stillwater, un laps de temps de l'ordre de 60 secondes ou moins a été choisi, et environ 10 secondes au barrage Elk Creek. Ce procédé a été employé avec succès pour certains mélanges sous certaines conditions (teneur plus élevée en ciment, granulats plus petits et dosage en eau plus élevé), mais il n'est pas nécessairement correct ou applicable à d'autres mélanges ou à d'autres conditions de chantier (comme des mélanges maigres avec des granulats plus gros). Au barrage Willow Creek, par exemple, afin d'assurer la remontée de la pâte pour toute durée de vibration, il a fallu adopter un mélange plus humide que celui utilisable sur le chantier (faible résistance mécanique, surdosage en ciment) [74]. Cette méthode a été un outil efficace pour reproduire les gâchées successives d'une centrale à béton dans les conditions de laboratoire, avec des BCR répondant à cette méthode d'essai. Dans certains cas, les mélanges définis à l'aide de cet essai sont utilisables dans les ouvrages. Les Fig. 4 et 5 [3] montrent les résultats d'essai de consistance en fonction de la durée de vibration.

Les moyens limités (équipements de laboratoire, personnel qualifié et expérimenté) ne doivent pas avoir d'effet sur les caractéristiques du béton à utiliser dans un ouvrage. Si les échantillons cylindriques de densité ou de résistance à la compression sont obtenus en laboratoire à partir de moules trop petits ou d'une énergie de compactage trop faible, ou bien les échantillons diffèrent du béton produit sur le chantier, ou bien l'opérateur est tenté d'ajouter une certaine quantité d'eau pour améliorer l'aspect des échantillons. Dans les deux cas, le résultat sera une résistance et une densité inférieures à ce qui peut être atteint sur le chantier. Il peut aussi en résulter un surdosage inutile en ciment ou en cendres volantes. Il faut une planche d'essais reproduisant les compositions de béton et le matériel de compactage proposés. On prélèvera des carottes dans le BCR durci pour déterminer la résistance à la compression. Durant les travaux, on fera des comparaisons pour

The lack of a clearly defined upper limit for consistency of RCC creates problems in the bonding of fresh layers when the consistency of the paste is inadequate to lubricate aggregate particles, when there is insufficient paste to fill the voids in the aggregates, or when control of aggregate grading and RCC placing techniques result in segregation. A different set of circumstances may exist if gap-graded aggregate concrete is used.

3.2.2. Workability

Concrete suitable for compaction with vibratory rollers differs significantly in appearance, in the unconsolidated state, from normal concrete having a measurable slump. There is little or no visual evidence of fluid paste in the mixture when deposited. RCC mixtures will fully consolidate to the maximum density attainable under sufficient compactive effort; however, the energy required is much greater than that required for concrete of measurable slump. Any externally applied method of compaction which is sufficient to fully compact the concrete can be used.

A modified Vebe apparatus having the standard size container has been used by some to determine a required "mixture design" consistency (paste and/or moisture content) for compaction in the field. It uses a vibrating rigid cylinder mold with a stiff steel plate and surcharge pressed down on top of each layer. The moisture content which allows paste to migrate up visually from around the rim of the surcharge plate within an arbitrary but consistent period of time is then considered correct for construction. For example, a time on the order of 60 seconds or less was judged to be appropriate for mixtures at Upper Stillwater Dam and about 10 seconds for mixtures at Elk Creek Dam. This procedure has been used successfully with some mixtures under some conditions (higher cement content, smaller aggregate, and higher water content), but it is not necessarily correct or applicable to other mixtures or actual field conditions (such as lean mixtures with larger aggregate). For example, in order for the paste to migrate upward to the surcharge plate at any vibration duration during construction of Willow Creek Dam, a mixture wetter than was usable in the field (and which gave low strengths or indicated the need for more cement than necessary) was required [74]. The surcharge procedure has been effective as a tool to help duplicate mixtures from batch to batch under laboratory conditions with RCC mixtures which will respond to the test method. Occasions have developed where these mixtures were also field usable. Fig. 4 and 5 [3] show results of vibration time tests for consistency.

Limitations in laboratory equipment, experience, and capabilities should not dictate the type of RCC or mixture proportions to be used in a construction project. If density or compressive strength cylinders are made by laboratory methods with insufficient mold size or compactive effort, either poor cylinders not representative of field quality will result, or the laboratory will add excess moisture to improve the appearance of the cylinders. In either case, lower strengths and density will result than are achievable in the field. This can result in the unwarranted use of extra cement or fly ash, an unnecessary overdesign. A test fill should be made using proposed mixtures and compaction equipment. Cores should be taken after the RCC hardens to determine compressive strength. During construction, comparisons should be made to see how closely laboratory procedures simulate field compaction and achieve similar qualities.

voir jusqu'à quel point les procédés de laboratoire arrivent effectivement à simuler le compactage sur le chantier et à reproduire les caractéristiques réelles du béton.

Il en est de même pour l'essai Vebe modifié : la maniabilité d'un BCR parfaitement compactable sur le chantier peut être mal caractérisée par cet appareil, avec, pour résultat, un surdosage en liant (ciment, cendres volantes) et/ou en eau. Les Japonais ont résolu ce problème en mettant au point un appareil du type Vebe de grande taille qui fonctionne effectivement avec un BCR à gros granulats, à granulométrie traditionnelle, et avec un dosage en ciment plus élevé. Cet appareil est effectivement beaucoup plus grand, fonctionne à fréquence plus élevée et fournit une énergie de compactage plus importante.

3.2.2.1. *Dosage en eau*

Des variations du dosage en eau de plus ou moins 6 kg/m³ ne sont pas inhabituelles lorsqu'il s'agit de régler la maniabilité ou la consistance du béton traditionnel. Des variations analogues sont à prévoir pour le réglage de la maniabilité du BCR. La composition du BCR doit être définie en tenant compte des granulats qui seront réellement utilisés pour les travaux, de la teneur en eau correspondant à la valeur médiane de la maniabilité recherchée. Cette valeur de la teneur en eau tirée de ces essais fournit le point de départ pour la production au chantier. Les conditions de chantier peuvent ne pas être identiques à celles du laboratoire. Il en découle que sur un chantier il peut être nécessaire de faire des ajustements pour tenir compte des conditions réelles (granulométrie, températures, humidité des granulats, engins de compactage) [74]. La teneur en eau moyenne d'un BCR sera influencée par la taille, la forme et la granulométrie des granulats, ainsi que par le volume de liant.

3.2.3. **Liants**

3.2.3.1. *Généralités*

Le BCR peut être produit à partir de n'importe quel type de ciment habituel et de pouzzolanes. Le choix du liant en vue de sa résistance aux sulfates et au risque de réaction alcali-granulats suit la pratique normale en matière de béton.

La résistance mécanique du béton dépend essentiellement de la qualité des granulats, du degré de compactage, des proportions de ciment, de pouzzolanes et d'eau. Le type de ciment utilisé a un effet marquant sur la vitesse d'hydratation et de développement de la résistance, et affecte donc les résistances dès le premier âge. Après 28 jours, l'écart entre les résistances correspondant à différents types de ciment (à dosage égal) diminue, les ciments à évolution plus lente des résistances engendrant finalement les résistances les plus élevées. La Fig. 6 donne les proportions d'eau, de ciment et de cendres volantes (ciments type I et II, et cendres de classe F de l'ASTM) correspondant à des résistances données.

3.2.3.2. *Béton de masse*

Les barrages BCR étant des ouvrages massifs, il est généralement conseillé d'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation lorsqu'ils sont disponibles. La chaleur engendrée à l'intérieur de la masse dépend du dosage en liant (ciment +

Similarly, if the modified Vebe test for workability is used on a mass mixture that would compact satisfactorily in the field but which does not respond well to the laboratory test, an inappropriate additional amount of cement, fly ash, and/or water could be required. The Japanese have overcome this problem by developing a massive Vebe-type apparatus that works effectively with RCC having large aggregate with conventional concrete aggregate gradings and higher cement factors. The specially built device is much larger, uses a higher frequency, and provides much more compactive energy.

3.2.2.1. *Mix water content*

Variations in water content of plus or minus 6 kg/m³ (10 lb/yd³) are not unusual in controlling the workability or consistency of conventional concrete. Similar variations can be expected in controlling the workability of RCC. RCC mixtures should be proportioned with aggregates representing what will be used during production and water contents corresponding to the midpoint of the workability that is desired. Such water contents from these tests will provide a good starting point for field production. Field conditions may not be the same as laboratory conditions. Therefore, adjustments to account for differing gradings, temperatures, moisture condition of the aggregate, and compactive equipment may be needed in the field [74]. The average design water content for a given RCC mixture proportion will be influenced by size, shape, and grading of aggregates, and the volume of cementitious materials.

3.2.3. **Cementitious materials**

3.2.3.1. *General*

RCC can be made from any of the basic cement types and types of pozzolans. Selection of cementitious materials for chemical resistance to sulfate attack and potential alkali reactivity with certain aggregates should follow standard concrete practice.

The strength of concrete is dependent essentially on the quality of the aggregate, degree of compaction, and the proportions of cement, pozzolan, and water. The type of cement has a significant effect on the rate of hydration and the rate of strength development and, therefore, significantly affects strengths at early ages. At ages beyond 28 days, the pound-for-pound difference in strength contributions for the various cement types decreases, with the slower strength-developing cements ultimately producing the highest strengths. For most, American Society for Testing and Materials (ASTM) Type I or II cements, Fig. 6, may be used to proportion equal strength concrete for varying proportions of cement and ASTM Class F fly ash.

3.2.3.2. *Mass concrete*

Because RCC dams are massive, the use of low heat cements is generally advisable when they are available. The total heat generated within the mass is governed by the total cementitious materials content of the mixture including the

pouzzolanes). Le post-refroidissement du BCR n'étant pas un procédé pratique, cette chaleur est un problème capital. Les ouvrages à faible résistance et par conséquent à faible dosage en liant peuvent souvent se passer de pouzzolanes en remplacement d'une certaine quantité de ciment pour réduire la chaleur d'hydratation. Lorsqu'on recherche une résistance ou une teneur en pâte plus élevées, on peut utiliser d'importantes quantités de pouzzolanes pour réduire les températures. Chaque chantier s'adaptera à ses propres besoins.

3.2.3.3. *Ciments*

Pour les ouvrages massifs, il est conseillé de choisir des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels les ciments ASTM type II ou les ciments mélangés avec un matériau d'apport (ciment de laitier et ciment pré-mélangé avec des pouzzolanes). A noter que l'évolution de la résistance est plus lente pour ces ciments que pour les ciments ordinaires.

Étant donné les faibles dosages en ciment utilisés dans les ouvrages en BCR et l'emploi généralisé de quantités assez importantes de pouzzolanes par mètre cube, il peut être possible d'autoriser un contenu plus important d'alcalis dans le ciment, à condition que la pouzzolane soit un inhibiteur efficace, sans nécessairement exposer le béton à une réaction alcali-silice.

3.2.3.4. *Pouzzolanes*

Le choix d'une pouzzolane est guidé par le respect des normes ou spécifications en vigueur, par son comportement dans le béton et par sa disponibilité sur le chantier. Dans les constructions en BCR, les pouzzolanes ont effectivement permis de réduire la chaleur d'hydratation, généralement sans perte de résistance à long terme, tout en augmentant le volume de pâte et ainsi la quantité d'éléments fins améliorant le compactage. Néanmoins, certains BCR maigres n'ont accusé qu'une faible augmentation de la résistance et certains ont même montré une perte de résistance suite à l'adjonction de pouzzolanes [74]. Les quantités de pouzzolanes utilisées (essentiellement des cendres volantes de classe F) ont varié de 30 à 75 % du volume de liant. Les cendres volantes (à cause de leur forme sphérique) ont été particulièrement efficaces dans les BCR qui contenaient un sable de granulométrie standard destiné à fournir des éléments fins pour améliorer le compactage. Dans d'autres BCR à granulats naturels fins, l'effet sur la maniabilité n'a pas été perceptible.

Dans le BCR à faible volume de pâte, une fonction principale des pouzzolanes ou d'autres éléments fins est de remplir les vides qui, à défaut, seraient occupés par le ciment ou l'eau. L'occupation par l'eau aura pour résultat évident de réduire la résistance mécanique du béton. Cependant, pour de nombreuses applications du BCR en grande masse demandant une bonne résistance à long terme, il est possible de remplacer une bonne partie du ciment par des pouzzolanes.

La qualité des pouzzolanes peut déterminer leur efficacité comme liant et le niveau du taux de substitution au ciment pour une résistance donnée. La quantité minimale de ciment nécessaire pour assurer un niveau donné de résistance dépend de la réactivité des pouzzolanes. Les avantages économiques des pouzzolanes doivent être comparés avec leur coût réel, la manutention et les essais, la disponibilité et la réactivité avec le ciment étant pris en compte. Lorsqu'il y a pénurie d'éléments naturels fins, une petite quantité de pouzzolanes peut être employée comme matériau de remplissage pour améliorer le compactage plutôt que comme liant contribuant à la résistance.

replacement percentage of pozzolan. Because postcooling has not been found to be practical in RCC construction, consideration of the heat generated is essential. Structures with low strength requirements and correspondingly low cementitious materials content may not need or benefit from the use of pozzolan as a substitute for some of the cement to lower the heat of hydration. Other mixtures requiring higher strength or paste contents have used substantial amounts of pozzolan with reduction in temperature. Each job should be evaluated on its own needs.

3.2.3.3. *Cements*

For massive applications, cements with low heat limitations such as ASTM Type II low heat or blended cements (slag cements and cements preblended with pozzolan) are recommended. Strength development of these cements is slower than that of standard cements and should be considered where necessary.

Because of the low cement factors used in RCC construction and the generalized use of relatively large amounts of pozzolan per cubic meter, it might be possible to allow higher alkalis content in cement, provided pozzolan is an effective inhibitor, without necessarily exposing the concrete to an alkali-silica reaction.

3.2.3.4. *Pozzolans*

The selection of a pozzolan suitable for RCC should be based on conformance with applicable standards or specifications, its performance in the concrete, and its availability to the project location. In RCC construction, the use of pozzolans has been successful in reducing heat generation as expected. In general, this has occurred without loss of long-term strength, increasing the paste volume of the mixture to provide additional fines for compaction. However, some lean mixtures have shown little strength gain and some have shown a strength loss by adding pozzolan [74]. Replacement levels of pozzolan, primarily Class F fly ash, where used, have ranged from 30 to 75 percent by volume of cementitious materials. Fly ash replacement (due to its spherical shape) has been particularly effective in RCC mixtures which utilize standard graded concrete sand as a means of providing fines to aid in compaction. In other mixtures with natural fines, the effect on workability has not been noticeable.

In proportioning mixtures for minimum paste volumes, one principal function of a pozzolan or other suitable fines is to occupy space which would otherwise be occupied by cement or water. To occupy this space with water would obviously result in reduced concrete strength. However, for many massive RCC applications with long-term strength requirements, liberal replacement levels are possible.

The quality of pozzolan may determine its effectiveness as a cementitious material and its replacement level with cement for a given strength. The minimum amount of cement needed to produce a given strength is affected by the reactivity of the pozzolan. The economic advantages of pozzolan usage should be compared with its cost, including handling and testing, availability, and its reactivity with cement. When there is a deficiency in natural fines, a lesser quality pozzolan may have use as a filler material to aid in compaction rather than as a cementitious material contributing to strength.

Lorsque le BCR contient des fines supplémentaires ayant la granulométrie du ciment et des pouzzolanes, il est raisonnable d'admettre qu'une réduction encore plus importante du rapport eau/(ciment + pouzzolane) est nécessaire pour maintenir la résistance à un âge donné. Ceci s'est produit sur plusieurs chantiers, mais il faut veiller à n'utiliser que des fines inertes, non plastiques et de bonne granulométrie. Lorsque le contenu total d'éléments fins, y compris le ciment et les pouzzolanes, dépasse environ 20 % du volume de mortier, la quantité d'eau requise pour maintenir les qualités rhéologiques subit une forte augmentation [10, Fig. 1].

3.2.4. Granulats

Le choix des granulats et le contrôle de la granulométrie sont des facteurs importants de la qualité, de la régularité et des propriétés du BCR. La variation des granulats au cours des travaux affecte de façon significative les besoins en ciment et en eau, dont dépendent, en retour, la résistance et le rendement. La résistance à la compression et la liaison entre couches aux joints de reprise sont des facteurs qui doivent donc être pris en considération lorsqu'il s'agit de définir les spécifications des granulats à utiliser. Si une qualité supérieure de béton est requise, les spécifications doivent alors définir le niveau nécessaire de contrôle des granulats utilisés. Réciproquement, si la liaison entre couches et la qualité du béton ne sont pas des facteurs importants, un BCR convenable peut être fabriqué avec des granulats provenant de différentes origines et présentant une variabilité plus importante.

Une étude complète des granulats pour béton est présentée dans le rapport du Comité n° 207 de l'ACI « Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures » (Béton de masse pour barrages et autres ouvrages massifs) [2]. Dans cette étude, les matériaux néfastes sont décrits comme étant ceux qui « ensemble ou séparément empêchent le béton d'atteindre les caractéristiques requises lorsque sont utilisées des proportions normales de constituants ». Les limites concernant les matériaux nuisibles du BCR sont définies par des essais ou par l'expérience acquise. Elles doivent être fixées selon leur effet sur les propriétés recherchées du béton, compte tenu de l'ouvrage à construire et des conditions de mise en place.

Sur les barrages en enrochement, les grands rouleaux vibrants peuvent compacter le tout-venant de carrière en couches atteignant 0,6 m d'épaisseur. Par conséquent, la taille des granulats n'est pas limitée par les engins de compactage. En ce qui concerne les granulats fabriqués, l'expérience a montré que les économies de coût réalisées avec des granulats supérieurs à 76 mm ne compensaient pas les coûts supplémentaires de malaxage et de lutte contre la ségrégation résultant de l'utilisation de granulats plus gros. Néanmoins, pour les matériaux d'emprunt ou tout-venant, l'élimination par criblage des éléments grossiers peut ne pas apporter d'économies. Au barrage de Tarbela [13], par exemple, les matériaux d'emprunt ou tout-venant contenaient des éléments jusqu'à 150 et 230 mm. Il faut évaluer soigneusement les avantages réellement apportés par le broyage des blocs de trop grandes dimensions contenus dans les matériaux naturels en vue de réduire les déchets, d'améliorer le comportement en déformation, de réduire la ségrégation. En définitive, l'utilisation de matériaux à granulométrie discontinue peut atténuer le problème de la ségrégation.

Lorsque l'épaisseur des couches est au moins trois fois plus grande que la dimension maximale des granulats, celle-ci a alors peu d'influence sur le compactage avec les engins vibrants utilisés à l'heure actuelle sur les enrochements compactés.

When the mixture contains additional fines in the particle size range of cement and pozzolan, it is reasonable to expect that an even greater reduction in $w/(c + p)$ ratio is required to maintain strength at a given age. This has occurred on several projects, but care must be exercised to use suitable non-plastic and well-graded inert fines. When the total fines content, including cement and pozzolan, of a mortar exceeds approximately 20 % of the mortar volume, there is a rapid increase in the amount of water required to maintain flow [10, Fig. 1].

3.2.4. Aggregates

The selection of aggregates and control of aggregate grading are important factors influencing the quality, uniformity, and properties of RCC. The variability of aggregates during construction significantly affects the cement and water requirements which, in turn, affect strength and yield. Compressive strength and bonding of construction joints are factors which should therefore be considered in specifying aggregates. If higher quality concrete is required, then the specifications should reflect an appropriate degree of control in consistency of aggregate as it is used in the RCC. Conversely, if bond strength and concrete quality are not significant factors, suitable RCC may be produced using various aggregate sources which have higher variability.

A full discussion of concrete aggregates is given in ACI Committee 207's report, " Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures " [2]. In that discussion, the deleterious substances are described as those " that either together or separately render it impossible to attain the required properties of concrete when employing normal proportions of the ingredients. " Limits for deleterious material for roller compacted application should be established by test or experience. These limits should be set according to their effect on the concrete properties required for the structure or placement involved.

Large vibratory rollers can compact quarry-run rock in layers as thick as 0.6 m (2 ft) in rockfill dams. Limitations on aggregate size are, therefore, not controlled by the lack of suitable compaction equipment. For manufactured aggregates, experience has shown that material cost savings in aggregate sizes larger than 76 mm (3 in) may not be sufficient to offset the added costs of batching and of handling the increased segregation problems associated with the larger aggregates. However, for bank- or pit-run materials, there may be no particular economy in screening out the larger aggregates. At Tarbela Dam [13], for example, the bank- or pit-run materials contained aggregates up to 152 and 229 mm (6 and 9 in) in size. The advantage of crushing oversize cobbles to reduce waste, improve strain capacity, and minimize segregation of bank gravels should be evaluated. Finally, the use of gap-graded aggregates may reduce the problem of segregation.

When the placement layers are more than three times the maximum size of aggregate, size has little influence on compactibility with the type of vibratory equipment presently utilized in rolled rockfills. Size of aggregate does influence

Cependant la taille des granulats peut influencer le compactage et la ségrégation. Lorsque des rouleaux plus petits sont utilisés pour compacter les matériaux adjacents aux ouvrages et aux appuis où une forte densité et une forte résistance sont requises, les granulats doivent être limités à 38 mm ou moins. Les granulats qui dépassent 38 mm ont une plus forte tendance à se séparer lorsqu'ils sont déversés, à cause de la plus grande inertie des gros éléments. Il faut en tenir compte lors du choix du matériel de transport et d'épandage ainsi que des méthodes de mise en place et d'épandage. Si le coût des granulats est un facteur principal dans le choix de leur dimension maximale, alors les dépenses à consentir pour maîtriser la ségrégation doivent également être prises en compte ou les conséquences de cette ségrégation doivent être identifiées lorsqu'on choisit les caractéristiques théoriques du béton : résistance, liaison entre couches, étanchéité.

Pour les ouvrages massifs en béton, le problème de la chaleur d'hydratation a plus de poids dans le choix de la dimension maximale des granulats que le prix de ceux-ci. La différence dans les exigences de dosage en ciment, pour des granulats de 38 à 76 mm, est moindre pour un BCR sans affaissement que pour un béton avec affaissement normal, mais il y a néanmoins, une économie de 15 % environ lorsqu'on adopte la dimension maximale. Il en résulte également une réduction de 15 % de la chaleur d'hydratation. Lorsque les pouzzolanes sont utilisées au maximum, le dégagement de chaleur peut être réduit de 50 %. L'utilisation de granulats dépassant 76 mm pour réduire la chaleur ou les coûts peut ne pas être justifiée.

La définition granulométrique des BCR a beaucoup varié. Ceux qui suivent les pratiques confirmées du béton traditionnel adoptent les règles traditionnelles concernant les discontinuités de la courbe granulométrique des gros granulats pour assurer l'uniformité du BCR. Par contre, on adopte souvent une courbe continue, de 75 μm (tamis n° 200) jusqu'à une limite supérieure qui peut atteindre 76 mm. En cas de granulométrie discontinue, la coupure est placée soit au milieu de la courbe, soit à l'endroit où un changement naturel se produit dans les dimensions des matériaux du site.

La granulométrie des granulats fins a une influence sur les besoins en pâte et sur la compactibilité du béton. Les granulométries du sable définies dans l'ASTM C 33 et/ou dans le Tableau 2.5.1. du document « Béton de masse pour barrages et autres ouvrages massifs » (Comité 207 de l'ACI) [2] ont été utilisées avec succès. Lorsque des pouzzolanes ne sont pas utilisées, une augmentation de 5 % de la fraction de passant 150 μm (tamis n° 100) peut être bénéfique. Lorsque le mélange est très maigre, une augmentation supplémentaire s'est avérée bénéfique. Les recherches en laboratoire peuvent démontrer que d'autres granulométries sont satisfaisantes. Une fois la granulométrie arrêtée, elle doit être maintenue dans des limites assez serrées afin de conserver la consistance recherchée.

Bien que des granulats propres et de granulométrie sévèrement contrôlée, tels ceux spécifiés par l'ASTM C 33, aient été employés pour certains BCR, des granulats non lavés ayant une granulométrie bien plus étendue ont été utilisés dans la majorité des ouvrages en BCR; le plus souvent il s'agit d'un béton maigre. La granulométrie des granulats et la teneur en fines affectent la compactibilité du béton et peuvent influencer le nombre minimal de passes du rouleau vibrant nécessaire à la parfaite consolidation d'une couche d'épaisseur donnée. La granulométrie des granulats influence également la quantité d'eau et de liant nécessaire pour combler les vides entre les éléments et pour enrober ceux-ci. La granulométrie idéale pour un minimum de pâte sera celle qui produira la densité maximale après vibration à

compactibility and segregation. When smaller rollers are used for compacting materials adjacent to structures and abutments where high density and strength are needed, aggregates should be limited to 38 mm (1-1/2 in) or less. There is a greater tendency for aggregates larger than 38 mm (1-1/2 in) to segregate when deposited, due to greater inertia of the larger particles. This should be recognized when selecting the transporting and spreading equipment and the placing and spreading methods. If material cost is a principal factor in the selection of the maximum size of aggregate, then the cost of controlling segregation should be considered or the consequences of segregation should be recognized in establishing strength, bonding, and permeability requirements.

In massive concrete placements, the control of hydration heat should have a greater significance than material costs in the selection of maximum aggregate size. While the difference in cement requirements for aggregate sizes from 38 to 76 mm (1-1/2 to 3 in) is less in no-slump concrete than in normal-slump concrete, there is still a savings of approximately 15 % when the larger size is used. This also results in a 15 % reduction in hydration heat. Where pozzolans are used to the maximum practical extent, heat generation may be reduced by as much as 50 %. The use of aggregate larger than 76 mm (3 in) may not be justified on the basis of either heat reduction or material cost saving.

Grading requirements for different RCC mixtures have varied significantly. When treated as a conventional concrete aggregate, control of uniformity for RCC requires that the normal separations in the coarse aggregate be followed. Many RCC mixtures have been proportioned with a continuous grading from as large an MSA as 76 mm (3 in) to minus 75 μ m (No. 200). The size separation can be made as nearly as possible to the midpoint of the grading or where a natural change in aggregate size fractions occurs.

For concrete aggregates, the grading of fine aggregate strongly influences paste requirements and compactibility of the concrete. Gradings of sand within the limits shown in ASTM C 33 and/or Table 2.5.1. of "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures" (ACI Committee 207) [2] have been used with good results. When no pozzolan is used, a 5 % increase in the percentage passing the 150 μ m (No. 100 sieve) may be beneficial. When the mixture is very lean, a further increase has been beneficial. Laboratory investigations may show other gradings to be satisfactory. Once the grading is established, it must be controlled within relatively close boundaries for RCC in order to maintain consistency within the prescribed limits.

Although clean aggregates with closely controlled gradings such as specified by ASTM C 33 have been used in some RCC, unwashed aggregates with much broader grading ranges have been used in the majority of RCC projects, typically with lean RCC mixtures. The aggregate grading and fines content affect the relative compactibility of the concrete and may influence the minimum number of vibrating passes required for full consolidation of a given layer thickness. Aggregate grading also affects the amount of water and cementitious material needed to fill the voids in the aggregate and coat the aggregate particles. The ideal grading for minimum paste requirements would be one which produces the maximum vibrated density at

teneur en eau optimale (volume minimal de vides). Il est également préférable d'avoir une faible surface si on désire enrober complètement toutes les particules avec la pâte de ciment.

Une grande variété de granulométries peut être utilisée tant que le volume de granulats après compactage ne dépasse pas 90 à 95 % du volume du béton. L'énergie nécessaire à la consolidation du BCR est directement proportionnelle au volume des gros granulats. Pour un volume donné de gros granulats, l'énergie est généralement minimale lorsque la granulométrie d'ensemble se situe vers le milieu de la fourchette normalement spécifiée. Si le volume de pâte est suffisant, une granulométrie étendue des granulats fins et grossiers n'aura probablement pas d'influence sur la densité en place d'un BCR compacté avec des gros engins vibrants, mais elle peut affecter le pourcentage de vides. Aussi convient-il toujours d'évaluer avec soin la possibilité d'utiliser, pour le BCR, des granulats à faible prix de revient, même si ceux-ci ne sont pas conformes aux normes habituelles.

La finesse et la granulométrie des granulats fins influencent le volume minimal de pâte nécessaire compte tenu des variations possibles de surface et de vides. Dans les zones où les pouzzolanes ne sont pas facilement disponibles, l'adjonction de sables ou l'introduction d'éléments minéraux fins pour réduire les vides dans les granulats de petites dimensions ont été des initiatives bénéfiques. Les granulats fins concassés présentent généralement un « Module de Finesse » élevé. Le dosage en sables ou l'optimisation de l'adjonction de minéraux fins peuvent être déterminés à partir de leurs effets sur le volume minimal de liant nécessaire.

3.2.5. Méthodes de dosage pour le BCR

3.2.5.1. Généralités

Un certain nombre de méthodes de dosage pour des ouvrages en BCR ont été utilisées avec succès dans le monde entier. Les chantiers différaient beaucoup par leur localisation géographique, le cahier des charges de l'ouvrage, les matériaux utilisés, les engins de malaxage et de mise en place, et les contraintes de temps. Les procédés de dosage du béton diffèrent également de façon significative suivant l'attitude adoptée pour le traitement des granulats, selon qu'ils sont considérés comme des granulats pour béton traditionnel ou comme des granulats pour remblai stabilisé. Les méthodes de dosage correspondant à la première de ces deux conceptions sont généralement celles utilisées pour le béton de masse traditionnel : évaluation des proportions optimales de granulats, avec des valeurs connues du rapport eau/liant (eau/c + p), pour obtenir les caractéristiques voulues de résistance, de liaison entre couches et d'élévation de température. Si on utilise des méthodes de dosage correspondant à des matériaux traités comme ceux de remblais stabilisés, on fait généralement appel à une granulométrie fixe et unique qui incorpore des dimensions allant de 50 à 76 mm à moins de 75 μm (tamis n° 200). On accorde une importance particulière à la détermination du dosage optimal en eau qui garantit un bon compactage pour des dosages donnés en liant. Le choix des dosages en liant et en eau est défini le plus souvent pour satisfaire aux conditions de résistance, en général résistance à la compression, tout en assurant un dosage minimal en ciment permettant d'éviter la fissuration thermique.

optimum moisture (least voids). Also, a low surface area is desirable if the intent is to coat completely all particles with cement paste.

A wide range of aggregate gradings may be used as long as the compacted volume of aggregate per unit volume of concrete does not exceed 90 to 95 %. The amount of effort required to consolidate the mixture is directly proportional to the coarse aggregate volume. For a given volume of coarse aggregate, the least amount of effort generally occurs when the combined grading of the aggregates is approximately midway between normally specified limits. If there is sufficient paste, a wide range of coarse and fine aggregate grading is not likely to affect in-place densities significantly when using large vibratory compaction equipment, but it could affect the percentage of voids. On this basis, the properties of RCC made with potentially economic sources of aggregates should be determined and judged for suitability in preference to rejection on the basis of nonconformance with standard specifications.

The fineness and grading of fine aggregate will affect minimum paste requirements as reflected in the range of possible surface areas and void contents. In areas where pozzolans are not readily available, blending sands or introducing mineral fines to reduce fine aggregate voids has been beneficial. Crushed fine aggregate will normally have a high Fineness Modulus (FM). The proportioning of blended sands or the optimizing of adding mineral fines can be determined by their effect on minimum cementitious materials volume requirements.

3.2.5. Mixture proportioning methods for RCC

3.2.5.1. General

A number of mixture proportioning methods have been successfully used for RCC structures throughout the world. Projects have differed significantly due to the location and design requirements of the structure, the materials, the mixing and placing equipment, and time constraints. Approaches to mixture proportioning also differ significantly due to the philosophy of treatment of aggregates as either a conventional concrete aggregate or as an aggregate approached from the standpoint of a stabilized embankment. Mixture proportioning methods for the classic conventional concrete approach generally follow procedures similar to those used for mass concrete; i.e., evaluating various aggregate proportions with known water to cementitious materials ratios $[w/(c + p)]$ to determine optimum proportions which meet proportioning requirements for strength, bond, and temperature considerations. Mixture proportioning for material treated similarly to a stabilized embankment generally uses a fixed single grading of aggregate incorporating size ranges from 50 to 76 mm (2 to 3 in) down to the minus 75 μm (No. 200) size fraction of sand. Emphasis is placed on determining optimum water content for compactibility at fixed cementitious materials content. Selection of cementitious materials content and water content is determined from design requirements, generally compressive strength, with consideration of minimizing the cementitious materials content to avoid thermal cracking.

Des méthodes spécifiques de dosage du BCR ont été mises au point par l'US Army Corps of Engineers [75].

3.2.5.2. Dosage du BCR à partir des résultats d'essais de maniabilité

a) Généralités

Le dosage correspondant à une maniabilité optimale appropriée au compactage a été utilisé comme base de travail par l'US Bureau of Reclamation pour la construction du barrage Upper Stillwater et par l'US Army Corps of Engineers pour la construction du barrage Elk Creek. L'essai de compactage modifié de Vebe [15, 39] (voir paragraphe 3.2.2.) est utilisé comme base pour déterminer la maniabilité et pour optimiser les proportions des granulats. L'appareil modifié de Vebe consiste en une table vibrante, à fréquence et amplitude fixes, sur laquelle est fixé un récipient de 0,01 m³. Un échantillon de BCR sans consistance est placé dans le récipient sous une charge de 9,0 ou 22,5 kg. L'échantillon est alors vibré jusqu'à ce qu'il soit entièrement consolidé. La durée « Vebe » est déterminée et comparée avec les essais *in situ* de compactage au rouleau vibrant. La durée optimale est définie à partir des essais de densité et des mesures effectuées sur des carottes. La durée optimale « Vebe » sera influencée par les proportions qui entrent dans le mélange, surtout le dosage en eau, le MSA (*), le dosage en sable et en éléments fins de moins de 75 µm (tamis n° 200). Les mélanges qui contiennent des sables à béton propres et des proportions fixes de granulats nécessitent généralement une durée de compactage « Vebe » de 20 à 30 secondes lorsque les échantillons ont un MSA de 38 mm. Les essais sur le barrage Elk Creek avec des MSA de 76 mm et un contenu plus important en éléments fins de moins de 75 µm (tamis n° 200) ont nécessité des durées de compactage « Vebe » d'environ 10 secondes.

b) Dosage en eau

L'effet de la durée de vibration et du dosage en eau sur la densité après compactage du béton aux cendres volantes et du béton au ciment Portland est illustré par les Fig. 4 et 5. Les densités maximales, exprimées en pourcentage de densité sans air, ont été obtenues après une vibration de 50 secondes avec peu, ou même aucune augmentation, pour un temps de vibration plus long. Sur la Fig. 4, les limites inférieure et supérieure des dosages en eau pour le béton aux cendres volantes ont été estimées à 68 et 86 kg/m³ avec un optimum à 77 kg/m³. En ce qui concerne le béton au ciment Portland, les limites sont 101 et 119 kg/m³ avec un optimum de 110 kg/m³. Pour les mélanges de ciment Portland et de cendres volantes, avec les mêmes granulats et des proportions voisines de liant, l'optimum serait compris entre ces deux valeurs suivant les proportions du mélange.

Si la diminution du dosage en eau est trop importante, il arrivera un moment où la résistance n'augmentera plus avec une diminution du rapport $e/(c + p)$. La raison en est que les vides dans les granulats ne seront plus comblés par la pâte et que de l'air restera occlus. Le Tableau 1 (Comité ACI n° 207) [3] indique les dosages en eau approximatifs requis pour les BCR. Lorsque le volume de pâte est trop faible, l'air occlus en quantité plus importante réduit la résistance à la compression.

(*) MSA (Maximum Size Aggregate) : Granulat de Dimension Maximale.

Specific mixture proportioning methods have been developed by the U.S. Army Corps of Engineers (Corps) [75] on roller compacted concrete.

3.2.5.2. *Proportioning RCC by evaluation of workability tests*

a) General

Proportioning for optimum workability suitable for compaction has been used as the basis of the U.S. Bureau of Reclamation's Upper Stillwater Dam and the Corps' Elk Creek Dam. The modified Vebe compactibility test [15, 39] (see Section 3.2.2.) is used as the basis for determining workability and optimizing aggregate proportions. The modified Vebe apparatus consists of a vibrating table of fixed frequency and amplitude with a 0.01 m³ (1/3 ft³) container attached to it. A loose RCC sample is placed in the container under a surcharge at either 9.0 or 22.5 kg (20 or 50 lb), and the sample is vibrated until fully consolidated. The Vebe time is determined and compared with on-site compaction tests with vibratory rollers. The optimum time is determined based on density tests and evaluation of core samples. This optimum Vebe time will be influenced by mixture proportions, particularly water content, MSA, sand content, and minus 75 μm (No. 200) fines content. Mixtures with clean concrete sands and fixed aggregate proportions generally require a Vebe time of 20 to 30 seconds to compact for samples with 38 mm (1-1/2 in) MSA. Tests at Elk Creek Dam using 76 mm (3 in) MSA with higher minus 75 μm (No. 200) fines content required Vebe times of approximately 10 seconds to compact.

b) Water content

The effect of vibration time and water content on the compacted density of fly ash concrete and portland cement concrete is shown in Fig. 4 and 5. Maximum densities, in percent of air-free density, occurred at a vibration time of 50 seconds with very little, if any, increase under extended vibration time. In Fig. 4, the lower and upper limits for water content for the fly ash concrete were considered as 68 and 86 kg/m³ (115 and 145 lb/yd³) with an optimum of 77 kg/m³ (130 lb/yd³). For the portland cement concrete, the limits were 101 and 119 kg/m³ (170 and 200 lb/yd³) with an optimum of 110 kg/m³ (185 lb/yd³). For blends of portland cement and fly ash with the same aggregates and approximately the same proportions of cementitious materials, the optimum should vary between these two, depending on the proportions of the blend.

If the water content is reduced too much, there will be a point at which the strength will no longer increase with a decrease in $w/(c + p)$ ratio. This is because aggregate voids will no longer be filled with paste, and entrapped air will be present. Table 1 (ACI Committee 207) [3] shows approximate water requirements for RCC mixtures. Where the paste volume is too low, an increase in entrapped air reduces the compressive strength.

Tableau 1. — Valeurs approximatives du dosage en eau requises pour des BCR sans pouzzolanes - (granulats fabriqués)

Type de béton	Dimension maximale des granulats, mm					
	9,5	19	38	76	114	152
	Dosage en eau, kg/m ³					
Béton de masse interne	116	107	98	86	80	77
Béton pour couche de liaison	128	119	110	—	—	—

NB : Les granulats utilisés dans les essais illustrés ici ont été fabriqués; des modifications dans les dosages en eau peuvent se produire lorsque des granulats naturels sont utilisés, mais les lois relatives aux énergies de compactage sont les mêmes avec les deux types de granulats.

c) Dosage en liant

Le dosage en liant sera défini à partir d'essais en laboratoire ou sur des planches d'essais, où l'on fait varier le dosage en ciment du béton dont les granulats ne sont pas sujets à ségrégation.

Le dosage en liant dépendra de la résistance, de l'adhérence entre couches et du comportement thermique requis. Pour assurer une résistance plus élevée, il faudra une plus grande quantité de liant pour un dosage en eau donné. L'utilisation d'une plus grande quantité de pouzzolanes peut être nécessaire pour diminuer la production de chaleur.

Le dosage en liant peut être défini à partir d'essais pratiqués sur du béton ou sur du mortier. Pour un dosage donné en liant, la résistance du béton à un âge donné sera maximale pour un volume de pâte qui remplira les vides minimaux dans les granulats. A un dosage en eau inférieur correspondra un volume de pâte laissant des poches d'air occlus non comblées, d'où une réduction de la résistance. En cas de dosage en eau plus élevé avec un excès de pâte, la résistance sera diminuée à cause de l'augmentation du rapport eau/(c + p). Par conséquent, comme le dosage en liant augmente, le dosage en eau peut être diminué pour la même maniabilité, et la résistance requise à un âge donné peut alors être optimisée. Il s'est avéré que les essais sur mortier étaient un moyen correct pour déterminer le coefficient eau/(c + p) correspondant aux résistances requises. Si l'on définit un dosage en mortier qui répond aux spécifications de résistance, la substitution de mortier à des granulats à gros éléments en proportions diverses déterminera les dosages en eau, en liant et en sable. Ce dernier point est traité dans le paragraphe *d*) suivant.

d) Dosage en gros granulats pour minimiser la quantité de mortier

Le dosage en gros granulats dépend des effets combinés des vides dans les granulats, de la surface et de la forme des éléments. Lorsque la granulométrie est contrôlée par criblage et séparation des granulats en différentes catégories de

Table 1. — Approximate mixing water requirements
for RCC mixes without pozzolans - Manufactured aggregates

Mix type	Maximum size aggregate, mm (in)					
	9.5 (3/8)	19 (3/4)	38 (1-1/2)	76 (3)	114 (4-1/2)	152 (6)
	Unit water content, kg/m ³ (lb/yd ³)					
Interior mass	116 (195)	107 (180)	98 (165)	86 (145)	80 (135)	77 (130)
Bedding mix	128 (215)	119 (200)	110 (185)	— —	— —	— —

Note : Although aggregates utilized in tests represented in this table were manufactured and some change in unit water contents can be expected when natural aggregates are used, the same basic relationships of compactive effort can be expected with both aggregate types.

c) Cementitious materials content

The cementitious materials content should be based upon laboratory tests or test fills where cement content is varied for an aggregate gradation which will not segregate.

The cementitious materials content will be dependent upon required strength, bond, and thermal considerations. Higher strength mixtures will require higher cementitious materials content at a desired water content. Greater use of a pozzolan may be required to minimize heat generation.

Cementitious materials content can be determined from tests on either concrete or mortar. For a given cementitious materials content, the strength of concrete of a given age will be maximized at a paste volume which fills the minimum voids of the aggregates. A lower water content will reduce the paste volume to a point where entrapped air voids are not filled, and strength will be reduced. At higher water content with excess paste, the strength will be lowered due to the higher $w/(c + p)$ ratio. Therefore, as the cementitious materials content increases, the water content can be lowered at the same workability, and strength can be optimized according to the requirements for a given age. The use of mortar tests has been found to be a suitable means of determining the $w/(c + p)$ ratio required for strength considerations. By developing a unit mortar content meeting strength requirements, substitution of mortar for coarse aggregate at various proportions will, therefore, determine the water, cementitious materials, and sand contents based upon the mortar required per unit volume of concrete, as discussed in the following Section 3.2.5.2. *d)*

d) Proportioning coarse aggregates for minimum mortar requirements

The proportioning of coarse aggregates depends upon the combined effects of aggregate voids, surface area, and particle shape. When gradings are controlled by screening and dividing the aggregates into separate size fractions, the void content

dimensions, le taux de vides peut être maintenu dans certaines limites. Les contrôles des densités sèches et de la granulométrie dépendent du dosage et des différentes catégories de dimensions des granulats, ainsi que des variations de granulométrie dans chaque catégorie de dimensions. La densité sèche après compactage augmentera avec la taille maximale des granulats, à condition que le contrôle de la granulométrie soit satisfaisant. Par conséquent, étant donné que le taux de vides diminue avec l'augmentation du poids sec, le taux de vides des granulats ayant la même masse spécifique dans chacune des catégories de dimensions diminuera au fur et à mesure qu'augmentera la taille des granulats. Il est également bien établi que la surface totale des granulats diminue au fur et à mesure qu'augmentent les proportions des gros granulats dans un volume unitaire donné. La forme des éléments de granulats fabriqués dépend du clivage de la roche et du type de concasseur utilisé. La compactibilité augmente avec les formes arrondies et cubiques et diminue avec les formes aplaties.

La meilleure granulométrie discontinue est en général obtenue en adoptant pour la catégorie de dimensions maximales une proportion de 50 à 75 % par rapport à la quantité totale des gros granulats et en maintenant la discontinuité dans la catégorie inférieure la plus proche ou, de préférence, dans les deux catégories inférieures les plus proches. Des problèmes de ségrégation peuvent se rencontrer avec une granulométrie discontinue à cause de l'augmentation de la proportion d'éléments plus gros. Dans un béton classique, les proportions d'éléments de taille plus petite sont généralement augmentées pour réduire la ségrégation. D'un point de vue économique, ceci amène aussi à utiliser toutes les tailles et à réduire les pertes dans les catégories des petits granulats. Le volume de gros granulats par volume unitaire de béton doit normalement se trouver dans les limites indiquées par le Tableau 2 ci-dessous [3].

Tableau 2. — Volume de gros granulats par volume unitaire de béton

Dimension maximale des granulats, en mm	152	114	76	38	19	9,5
Volume de granulats, en % du volume de béton	63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

Pour toute granulométrie, ou dimension maximale de granulats, le volume minimal de granulats qui donne une consistance sans « slump » peut être obtenu en dosant le mortier pour produire à peu près la résistance requise et en ajustant les proportions de gros granulats et de mortier pour obtenir un « slump » de l'ordre de zéro. Durant ces ajustements, les proportions de granulats fins, de liant et d'eau devront rester stables. La limite supérieure du volume de mortier correspond à la quantité créant tout juste les conditions de « slump » nul, de sorte que toute augmentation en quantité produira un « slump » qui pourra être mesuré. La durée de vibration requise pour consolider complètement ce mélange correspondra généralement à la consistance minimale permettant au béton de supporter les engins vibrants. Pour déterminer la durée de vibration, il faut garder constante la compo-

may be controlled within limits. Dry-rodded densities and combined grading control are dependent upon the proportioning and number of separated sizes and the variation of gradings within the individual sizes. Provided the grading control is satisfactory, the dry-rodded density will increase with maximum aggregate size. Therefore, since void content decreases with increased dry-rodded weight, the void content of aggregates with the same specific gravity in each size range will decrease with increased aggregate size. It is also well established that the total surface area of the combined aggregate will decrease as the proportions of large aggregate in a given unit volume are increased. Particle shape of manufactured aggregates is controlled by the cleavage of the rock and type of crusher. Compactibility increases with rounded and cubical shapes and decreases with flattened shapes.

In gap grading, the ideal grading is generally achieved by proportioning the largest size grouping to 50 to 75 % of the coarse aggregate with the gap being maintained in the next smaller or, preferably, the next two smaller size groupings. Segregation problems may be encountered with gap gradings because of the increased proportions of the larger size particles. In conventional concrete, the proportions of smaller sizes are generally increased to reduce segregation. From an economic standpoint, this also results in utilizing all size groups and reducing waste in the smaller aggregate fractions. The absolute volume of coarse aggregate per volume of concrete will normally fall within the limits of the following Table 2 [3].

Table 2. — Absolute volume of coarse aggregates per unit volume of concrete C_v

Maximum size aggregate, mm	152	114	76	38	19	9.5
Maximum size aggregate, in ..	6	4-1/2	3	1-1/2	3/4	3/8
Absolute volume, percent of unit concrete volume	63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

For any grading of, or maximum size aggregate, the minimum aggregate volume producing no-slump consistency can be established by proportioning the mortar fraction to yield the approximate strength required and adjusting the proportions of coarse aggregate and mortar to achieve a zero slump. The proportions of fine aggregate, cementitious material, and water should remain in a fixed relationship during these adjustments. The upper limit of mortar volume corresponds to the quantity barely producing zero slump conditions, so that any increase in quantity will produce a measurable slump. The vibration time required to consolidate this mixture fully will generally correspond to the minimum stiffness necessary to support the vibratory equipment. To determine the vibration time, keep the makeup of the mortar constant, increase the coarse aggregate volume and decrease the mortar

sition du mortier, augmenter le volume de gros granulats et diminuer le volume de mortier progressivement par pas constants, et vérifier que l'on obtient une consolidation adéquate. La limite du volume de mortier qui produit la consistance voulue sera reconnue lorsque l'augmentation des proportions de gros granulats aura pour résultat une diminution substantielle en densité pour une énergie de compactage donnée (voir Fig. 7). Un volume de gros granulats se situant à mi-chemin entre ces limites minimisera les problèmes de contrôle durant la mise en place (56 % dans le présent exemple).

e) Dosage en granulats fins pour le minimum de pâte requis

Le taux de vides dans les granulats fins déterminé par des mesures de poids sec est normalement de l'ordre de 34 à 42 %. Le taux réel de vides peut être légèrement inférieur compte tenu des difficultés de mesures, mais ce point a peu d'importance étant donné que les teneurs minimales en ciment, en pouzzolanes, en air et en eau requises pour obtenir un béton compact doivent permettre de combler tous les vides des granulats fins et d'enrober tous les éléments de granulats. Le volume minimal de pâte peut ainsi être déterminé par des courbes de densité maximale de la même façon que le dosage optimal en eau peut être déterminé pour les sols. Le procédé est le suivant :

1) A partir du rapport eau/ciment ou eau/(ensemble du liant) spécifié pour le béton, ajouter des granulats fins par quantités égales et mesurer la densité des échantillons par la méthode de compactage des sols ou par vibration prolongée.

2) Tracer la courbe de la densité en fonction des volumes calculés de pâte.

3) Déterminer le volume de pâte produisant la densité maximale des échantillons de mortier. Ce volume de pâte, exprimé en pourcentage du volume total de mortier, doit être augmenté de 5 à 10 % lors du dosage des bétons de masse. Pour les bétons spéciaux prévus pour les couches de liaison des joints de reprise, ce pourcentage minimal doit être augmenté de 20 à 25 %.

f) Choix des compositions pour le BCR

Les bétons sans « slump », dosés conformément aux instructions du rapport 211.3-75 de l'ACI de 1975 [4], n'auront pas la consistance nécessaire pour supporter le poids des grands rouleaux vibrants. Pour le permettre, il faut apporter des changements au procédé. Les dosages en eau des mélanges devront se rapprocher au plus près de ceux du Tableau 1 (paragraphe 3.2.5.2. *b*) du présent Bulletin plutôt que de ceux du Tableau 2.3.1. *c*) du rapport 211.3-75 de l'ACI (1975). Si le procédé 211.3-75 de l'ACI est utilisé, il est alors recommandé un rapport minimal eau/ciment de 0,6 (en poids) pour le béton sans pouzzolanes destiné à la partie centrale des barrages, afin d'obtenir un volume de pâte suffisant pour combler les vides dans les granulats et garantir une perméabilité suffisamment faible. Ceci aura pour conséquence une augmentation des résistances et de la chaleur dégagée, supérieure à ce qui est normalement requis ou voulu pour le béton interne d'un barrage. Il est également recommandé de remplacer le ciment par des pouzzolanes en quantités suffisantes pour obtenir la diminution requise de la chaleur d'hydratation ou la résistance nécessaire.

Il est également possible de doser le béton par une méthode faisant intervenir la densité maximale.

volume in equal increments, and check the vibration time for adequate consolidation. The outer limit of mortar volume for consistency will be recognized when the incremental increase in coarse aggregate proportions results in a substantial decrease in density for a given compactive effort, as illustrated in Fig. 7. A coarse aggregate volume approximately halfway between these limits will minimize control problems during placement (56 % in this example).

e) Proportioning fine aggregates for minimum paste requirement

The void content of fine aggregate as determined in dry-rodding weight measurements normally ranges from 34 to 42 %. The actual void content may be somewhat smaller due to the inefficiency of the measurement, but it makes little difference since the minimum cement, pozzolan, air, and water contents required to achieve a solid volume must fill all the fine aggregate voids and coat all the aggregate particles. The minimum paste volume can thus be determined by maximum density curves in much the same way as optimum water content is determined for soils. The procedure is as follows :

1) Using the water-cement ratio or water-to-total-cementitious-material ratio requirements of the mixture, add fine aggregate in equal increments and measure the density of specimens using soil compaction procedures or extended vibration.

2) Plot density versus the calculated paste volumes.

3) Determine the paste volume producing maximum density of the mortar specimens. This paste volume, as a ratio of the total mortar volume, should be increased from 5 to 10 % in proportioning the mass mixtures. For special mixtures designed as bedding mixtures for construction joints, this minimum paste volume ratio should be increased from 20 to 25 %.

f) Selecting mixture proportions for RCC

The consistency of no-slump mixtures proportioned in accordance with ACI 211.3-75 (1975) [4] will not support the weight of large vibrating rollers without some alteration to the procedure. The water content of the mixtures should correspond more closely to Table 1 (section 3.2.5.2. *b*) of this report rather than Table 2.3.1. *c*) of ACI 211.3-75 (1975). In using the ACI 211.3-75 procedure, a maximum water-cement ratio by weight of 0.6 is recommended for interior mixtures without pozzolans to ensure a sufficient paste volume to fill the aggregate voids and ensure sufficiently low permeability. This will produce higher strengths and higher heat rise than normally needed or desired for the interior concrete of a dam. Substitutions of pozzolan for cement are recommended to the extent necessary to achieve the desired strength requirements or needed reduction in hydration heat.

An alternative method of mixture proportioning involving a maximum density approach is also practicable.

3.2.5.3. *Dosage des bétons à l'aide d'essais*

a) Généralités

Les projeteurs d'un bon nombre d'ouvrages en BCR ont dosé les bétons en utilisant une granulométrie des granulats relativement constante tout en faisant varier le dosage en ciment. Le dosage minimal en ciment, qui fournit la résistance requise et un mélange utilisable sur le chantier, est ensuite choisi. Dans certains cas, la nécessité d'assurer une bonne liaison entre couches successives peut imposer le dosage minimal de ciment à utiliser. La teneur en pâte de ces bétons est beaucoup plus proche de celle qui est requise pour combler les vides dans les granulats. Ce procédé a été largement utilisé avec des teneurs en liant allant d'environ 30 à 300 kg/m³, avec des résistances à un an variant de 4 à 40 MPa environ.

b) Dosage en eau

Le dosage en eau est choisi pour obtenir la densité maximale durant le compactage. La quantité d'eau correspondra à un niveau d'humidité juste au-dessous du niveau où apparaît une pression interstitielle dans le mélange et au-dessus du niveau où la ségrégation commence à être un problème. Au cours de la production des premières gâchées de BCR, le dosage en eau est modifié pour obtenir la teneur en eau optimale. Une fois le dosage en eau fixé, il variera peu ou pas du tout alors que le dosage en ciment changera suivant un large éventail de valeurs (voir paragraphe 3.2.1.). Durant les travaux, le contrôle du dosage en eau est surtout visuel : il se détermine en contrôlant que le compactage est optimal, avec confirmation par des mesures nucléaires de densité. La quantité d'eau rajoutée en centrale à béton permettra de pallier toute perte susceptible de se produire par évaporation durant le transport et la mise en place.

c) Liants

En règle générale, la première série d'essais est effectuée avec du ciment seulement et avec une substitution de 25 à 50 % de pouzzolanes. Sur les grands chantiers, d'autres mélanges, avec des teneurs en pouzzolanes variables, sont préparés pour obtenir un mélange ciment-pouzzolane le plus économique possible répondant aux spécifications du projet. Lorsqu'il y a possibilité de produire ou d'extraire des éléments fins naturels, toute une série de mélanges peuvent alors être préparés pour établir quelle réduction de ciment ou de pouzzolanes est possible par adjonction de fines.

d) Granulats

A partir des sources d'emprunt disponibles (graviers, matériaux de carrière, sables de rivière et silts), la combinaison la plus économique de matériaux bruts pour produire une granulométrie régulière dans le cadre général des limites apparaissant sur la Fig. 8 est mise en œuvre pour utilisation en tant que granulométrie constante pour le chantier et base du dosage du mélange. L'expérience a montré que toute granulométrie régulière à l'intérieur de ces limites produisait un BCR facile à compacter.

3.2.5.3. *Mixture proportioning by trials*

a) General

Designers of a number of RCC structures have proportioned the concrete mixtures using a relatively fixed grading of aggregates while varying cementitious contents. The minimum cement content which provides the required design strength and a field-usable mixture is then selected for the project. In some cases the requirements for bond between succeeding lifts may dictate the minimum cement content to be used. The paste content of these mixtures is much closer to that required to fill the voids in the aggregates. This procedure has been used extensively with cementitious materials contents ranging from about 30 to 300 kg/m³ (50 to 500 lb/yd³) with strengths at 1 year ranging from about 4 to 40 MPa (580 to 5 800 lb/in²).

b) Water content

The water content is controlled to achieve maximum density during compaction. That amount of water will correspond to a moisture level just below where pore pressure of the mixture develops and just above where segregation begins to be a problem. During the first few batches of RCC, the water content is varied to establish the optimum moisture. Once the water content is established, it typically will vary little or not at all as the cement content is changed through a wide range of values (See Section 3.2.1.). During construction, control of water content is largely visual as determined by the placing inspection for optimum compaction and confirmed by nuclear density testing. The amount of water added at the plant should allow for whatever loss occurs by evaporation during transport and placement.

c) Cementitious materials

Usually, the first set of trials is made with cement only and with a substitution of 25 to 50 % pozzolan. On large projects, additional mixtures with varying pozzolan contents are made to optimize the most economical cement and pozzolan combination that meets design requirements. When the option to produce or excavate suitable natural fines exists, a series of mixtures can be made to establish what reduction in cement or pozzolan, if any, is achievable by adding more fines.

d) Aggregates

With the borrow sources available (gravels, quarry materials, river sands, and silts), the most economical combination of raw materials to produce a smooth overall grading within the general broad limits shown on Fig. 8 is used as the fixed grading for the project and the basis for mixture proportioning. Experience has shown that any smooth grading within this band will produce a compactible RCC.

La teneur admissible en éléments fins dépend de la plasticité; si les éléments fins ne sont pas plastiques, des pourcentages plus élevés sont autorisés. Certains BCR ont admis avec succès des fines jusqu'à 10 % du poids total de granulats, soit plus de quatre fois ce qui est normalement autorisé dans un sable pour béton. Le fait d'ajouter des éléments fins non-plastiques, ayant une bonne granulométrie, peut améliorer le compactage, l'imperméabilité et la résistance.

Le dosage en sable est généralement plus élevé que dans le cas d'un béton normal de masse, se plaçant dans une fourchette de 30 à 45 %. Ceci joue un rôle d'amortisseur pour les granulats de plus fort calibre, afin de réduire les ruptures résultant du compactage, de réduire la ségrégation et de faciliter le compactage. Dans le cas du barrage Willow Creek (États-Unis), il n'y avait pas de séparation des granulats fins et des granulats grossiers.

e) Choix de la composition du mélange

Après étude en laboratoire de mélanges de BCR avec différents teneurs en ciment, une série de cylindres sont rompus pour chaque composition de ciment et à divers âges. En général, il y a deux cylindres aux âges suivants : 2, 7, 14, 28, 56, 90, 180 et 365 jours. On exécute aussi généralement des essais pour déterminer le module d'élasticité, la résistance à la traction (méthode indirecte par fendage du cylindre) et d'autres caractéristiques. À partir de ces essais, les effets du dosage en ciment et d'autres variables étudiées, telles que les pouzzolanes et les éléments fins ajoutés, sont déterminés pour un vaste champ de conditions présentant de l'intérêt; le mélange le plus économique peut ainsi être choisi.

Ces essais permettent de tracer une famille de graphiques montrant l'effet de ces variables, et aussi de l'âge, sur les propriétés du matériau. Ayant des résultats pour diverses éprouvettes d'âge jeune, on peut tracer des graphiques sur papier semi-logarithmique (exemple, Fig. 9, résistance à la compression) et prévoir les propriétés à des âges plus avancés. On peut adopter la même méthode pour d'autres propriétés du matériau. On peut tirer de ces graphiques une famille de courbes, telles celles représentées sur la Fig. 10. Ces courbes permettent de déterminer le dosage en ciment nécessaire à l'obtention d'une résistance donnée à un âge donné. Il se peut alors qu'il ne soit pas indispensable de procéder à d'autres essais en laboratoire ni d'attendre des résultats de chantier.

Pour que ce procédé soit efficace, il est indispensable de rapprocher les résultats des mesures de densité faites sur le chantier de ceux des essais sur carottes.

3.2.5.4. *Dosage à l'aide des méthodes utilisées dans le compactage des sols*

a) Généralités

Des BCR satisfaisants ont été obtenus à l'aide de procédés utilisés dans le compactage des sols [57]. Cette méthode implique la détermination de la densité sèche maximale des matériaux à l'aide de procédures adaptées, et elle peut être considérée comme un prolongement de la technologie du sol-ciment. Les dosages optimaux en eau sont déterminés au moyen des méthodes utilisées pour obtenir les teneurs en eau optimales des sols. Pour adapter ces méthodes au BCR, il faut modifier le matériel qui sert à exécuter les essais de compactage. Sur le barrage de Tarbela, au Pakistan, on a utilisé un récipient d'un diamètre de 355 mm et une

The allowable fines content depends on plasticity; if the fines are nonplastic, greater percentages are allowed. As much as 10 % fines by weight of total aggregate have been used successfully in some RCC mixtures, more than four times what is normally allowed in graded concrete sand. Adding well-graded nonplastic fines may improve compactibility, impermeability, and strength.

The sand content is usually higher than that of normal mass concrete, ranging from 30 to 45 %. This provides cushioning for the larger sized aggregate, to minimize breakage from compaction, to minimize segregation, and to aid in compaction. In the case of Willow Creek Dam, USA, there was no separation of fine and coarse aggregate.

e) Selection of the project mixture

After the laboratory RCC mixtures have been made with varying cement contents, a series of cylinders is broken for each cement factor at a large range of ages. Typically, this includes two cylinders at the age of 2, 7, 14, 28, 56, 90, 180, and 365 days. Tests for modulus of elasticity, indirect (splitting) cylinder tensile strength, and other properties are also usually made. From these data the effects of cement content and other tested variables such as pozzolan and added fines are determined for the broad range of conditions that encompasses possibilities that may be of interest, and the most economical mixture can be selected.

Using the test data, a family of graphs can be developed showing the effect of these variables as well as age on material properties. By having adequate data for a variety of early age specimens, semi-log plots such as that shown in Fig. 9 for compressive strength can be drawn and later age properties can be predicted. The same procedure can be used for other material properties. These graphs, in turn, can be used to develop a family of curves such as the one in Fig. 10. From these curves, the required cement content needed to achieve any strength at any age can be obtained. Performing further laboratory tests and waiting for results may not be necessary.

In order for this procedure to be effective, coordination with data obtained from field density and core tests is essential.

3.2.5.4. *Proportioning using soils compaction methods*

a) General

RCC mixtures have successfully been proportioned using soils compaction procedures [57]. This method involves determining the maximum dry density of materials using modified compaction procedures and can be considered an extension of soil-cement technology. Optimum water contents are established using procedures for establishing optimum water contents of soils. To accomplish this with RCC, the compaction test equipment requires modification. The Tarbela Dam project, Pakistan, used a 355 mm (14 in) diameter container and an equivalent modified American Association of State Highway Officials (AASHO) procedure to

méthode modifiée équivalente de l'American Association of State Highway Officials (AASHO) pour déterminer la courbe maximale de densité sèche du BCR. Afin que le maximum puisse être distinctement déterminé sur la courbe des densités, le dosage en liant de tous les échantillons soumis aux essais doit rester constant et la granulométrie des granulats doit être dans la zone médiane entre les limites imposées par les spécifications techniques. On peut s'attendre à des résultats variables sauf si la granulométrie et la teneur en eau des granulats sont maintenues relativement constantes. Le maximum de la courbe de densité indique le point qui correspond au volume minimal de pâte nécessaire pour combler tous les vides entre granulats.

Le BCR a également été dosé en utilisant un matériel de compactage des sols, dérivé de celui utilisé dans la méthode ASTM D 1557 (Proctor modifié). Des transformations ont été faites pour compacter des échantillons dans un moule de 150 mm par 300 mm, de préférence à un moule de 100 par 200 mm utilisé pour des granulats plus gros. Le compactage dépend de l'énergie appliquée à l'échantillon. Pour l'énergie de compactage de l'essai Proctor modifié de $2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, il y a une correspondance satisfaisante avec les résultats de mesures de densités *in situ*, à condition que la teneur en eau soit proche de l'optimum.

b) Dosage en eau

Le dosage optimal en eau, dans les différentes méthodes dérivées de celles utilisées pour les sols, dépend des granulats utilisés, du dosage en liant et de l'énergie de compactage appliquée. Étant donné qu'au dosage optimal correspond le volume minimal de pâte requis pour combler les vides sous un effort de compactage donné, une perte de résistance se produira si le dosage en eau est inférieur à l'optimum, à cause de la présence d'air occlus, et s'il est supérieur à l'optimum, à cause d'un rapport eau/(c + p) plus élevé. Le dosage en eau est exprimé en pourcentage d'eau par rapport au poids sec des matériaux solides. Il variera du fait de la variation de la masse spécifique des matériaux et des valeurs d'absorption. Par conséquent, il est difficile de comparer les résistances des bétons pour différentes valeurs du rapport eau/(c + p) qui dépend de la teneur en eau SSD (saturated-surface dry).

c) Dosage en liant

Le dosage en liant est déterminé à partir de la mesure de la résistance à la compression, pour le dosage optimal en eau, de différents mélanges. Le ciment et les pouzzolanes interviennent dans cette méthode de dosage et sont, là encore, exprimés en pourcentage du poids sec des matériaux solides. Par conséquent, le dosage en ciment peut varier quelque peu, comme c'est le cas pour le dosage en eau, du fait des variations des propriétés physiques des matériaux. Les dosages en liant se situent dans une fourchette de 7 à 15 % du poids sec des matériaux solides (densités sèches de $1\,920$ à $2\,240\text{ kg}/\text{m}^3$). La fourchette peut correspondre à environ $150\text{-}300\text{ kg}/\text{m}^3$, exprimés en poids des matériaux solides par unité de volume.

d) Granulats

Les travaux exécutés sur le barrage de Tarbela ont fait appel à un MSA (granulat de dimension maximale) allant de 150 à 230 mm. Aux États-Unis, le MSA a généralement été limité à 51 mm-76 mm et tout le béton peut être utilisé pour les essais de densité. Il est important que les éléments fins de moins de $75\ \mu\text{m}$ (tamis

determine the maximum dry density curve for RCC. In order to determine a distinct peak to the maximum density curve, the cementitious material content of all test specimens should remain constant and the aggregate grading should be in the midrange of the specification limits. Variable results may be expected unless the gradation and moisture content of the aggregates are maintained relatively constant. The peak of the density curve indicates the point corresponding to the minimum paste volume needed to fill all aggregate voids.

RCC has also been proportioned using soils compaction equipment similar to the ASTM D 1557 (modified Proctor) test method. Modifications were made to compact specimens in a 150 by 300 mm (6 by 12 in) mold rather than the 100 by 200 mm (4 by 8 in) mold used for larger sized aggregate. The compaction is dependent upon the energy imparted to the specimen. The compactive effort of the modified Proctor test of 2 700 kg · m/m³ (32.6 ft-lb/in³) has been found to correspond closely to in-place density measurements, provided water content is near optimum.

b) Water content

The optimum water content for use in the soils compaction methods will be dependent on the aggregates used, the cementitious materials content, and the compactive effort applied. Since this represents the minimum paste volume required to fill voids at a compactive effort, loss of strength will occur with a water content less than optimum due to the presence of entrapped air voids, as well as greater than optimum due to a higher $w/(c + p)$ ratio. Water content is expressed as percent moisture by dry weight of solids. This will vary due to the varying specific gravities of materials and values of absorption. Therefore, it is difficult to compare strengths at different mixtures due to the variation of $w/(c + p)$ which is dependent on the saturated-surface dry (SSD) water content.

c) Cementitious materials content

The cementitious materials content is determined by compressive strength at optimum water content for different mixtures. Cement and pozzolan have been used for this mixture proportioning method and are again expressed as a percentage of dry weight of solids. The cement content can therefore vary somewhat, as with water content, due to variations in physical properties of materials. Cementitious materials contents have ranged from 7 to 15 % by dry weight of solids which have dry densities ranging from 1 920 to 2 240 kg/m³ (120 to 140 lb/ft³). The range may correspond to approximately 150 to 300 kg/m³ (250 to 500 lb/yd³) when expressed in solid weight per unit volume.

d) Aggregates

The work performed at Tarbela Dam used an MSA ranging from 150 to 230 mm (6 to 9 in). In the USA, the MSA has been generally limited to 51 to 76 mm (2 to 3 in), and the full RCC mixture can be used in density testing. It is important that the minus 75 μ m (No. 200) fines content be sufficient for soil compaction procedures

n° 200) soient en quantité suffisante pour que puissent être appliquées les méthodes dérivées de celles du compactage des sols. La granulométrie moyenne spécifiée est donnée dans le Tableau 3 [57]. La teneur en éléments fins atteint en moyenne 12 % environ du contenu total en granulats pour une proportion de granulats fins d'environ 35 %. Des variations du dosage en granulats et de la teneur en eau engendreront des variations de densité et des propriétés du béton qui lui sont liées.

Tableau 3 - Granulométrie des granulats pour BCR, déterminée par des méthodes dérivées de celles utilisées dans le compactage des sols (pourcentages cumulés de passant)

Dimension	Fourchette spécifiée	Moyenne
50 mm	100	100
19,0 mm	56 à 91	70
9,5 mm	38 à 80	49
4,75 mm	26 à 65	35
2,00 mm	10 à 49	25
425 µm	12 à 25	18
75 µm	9 à 16	12

3.2.6. Adjuvants

Les avantages que l'on retire de l'utilisation d'adjuvants augmentant la maniabilité et retardant la prise du béton, en vue de garder « vivante » la masse d'un béton traditionnel et d'éviter les joints secs, surtout lorsqu'il fait chaud, ont été solidement établis. Les adjuvants entraîneurs d'air, réducteurs d'eau et retardateurs de prise ont été testés pour le BCR. Des travaux de grande envergure aussi bien en laboratoire que sur le terrain, sur le barrage Willow Creek [74] et sur d'autres chantiers, ont montré qu'il n'y avait pas d'effets perceptibles de ces adjuvants sur les BCR de masse, de consistance plus raide. Ces résultats sont relatifs à une large gamme de dosages en ciment et en adjuvants allant jusqu'à plusieurs fois le taux normal. D'autres travaux de recherche, surtout en laboratoire et dans des planches d'essais, ont donné des résultats positifs [55]. Les bétons utilisés sont fabriqués avec un granulat plus petit, plus d'eau et plus de liant. Il semble que les adjuvants soient efficaces lorsqu'on ajoute assez d'eau pour produire une pâte fluide ou semi-fluide. Néanmoins, cette condition de fluidité de la pâte n'est pas réalisée sur la plupart des barrages BCR.

3.3. CONSIDÉRATIONS SUR LA CONSTRUCTION

3.3.1. Généralités

Le BCR a des avantages très nets sur le béton traditionnel, entre autres : (1) un coût réduit en matériaux, (2) une durée plus courte de construction et donc des conditions de travail plus sûres, une meilleure maîtrise de la dérivation de la rivière et du passage des crues, ce qui implique moins de risques. Ce dernier point repose

to apply. The average grading specified is shown in Table 3 [57]. The fines content has averaged approximately 12 % of the total aggregate content, with a fine aggregate content of approximately 35 %. Variations in aggregate materials and moisture contents will lead to variations in densities achieved and associated concrete properties.

Table 3. — Aggregate grading for RCC aggregates using modified soil compaction methods - cumulative percent passing

Size	Specification Range	Average
50 mm (2 in)	100	100
19.0 mm (3/4 in)	56 to 91	70
9.5 mm (3/8 in)	38 to 80	49
4.75 mm (No. 4)	26 to 65	35
2.00 mm (No. 10)	10 to 49	25
425 μ m (No. 40)	12 to 25	18
75 μ m (No. 200)	9 to 16	12

3.2.6. Admixtures

The advantages of using admixtures which enhance workability and retard set for keeping conventional mass concrete “ alive ” and preventing cold joints, particularly during hot weather, are well established. Air-entraining, water-reducing, and retarding admixtures have been tried in RCC. Extensive laboratory and field work at Willow Creek Dam [74] and other projects has shown no discernible effect of these admixtures on stiffer consistency mass RCC. This includes a broad range of cement contents and admixture dosages many times the normal rate. Other work, mostly in the laboratory and in test sections, has indicated some success [55]. These mixtures typically have smaller aggregate, more water, and higher cementitious contents. It appears that admixtures may be effective when sufficient water is added to create a fluid or semi-fluid paste. However, at the drier consistency that most RCC dams have used, this fluid paste condition does not occur.

3.3. CONSTRUCTION CONSIDERATIONS

3.3.1. General

Roller compacted concrete (RCC) has definite advantages over conventional mass concrete, including (1) reduced cost of materials, and (2) a shortened construction period and, therefore, safer working conditions during construction and improved handling of river diversion and floodwater, involving less risk. This

sur deux faits, le premier étant que la dérivation de la rivière est plus simple avec des barrages en béton qu'avec des barrages en terre ou en enrochement parce qu'il est possible, dans le premier cas, de faire passer des conduits plus courts au travers de la masse de béton au lieu de faire traverser les appuis par de longues et coûteuses galeries; le deuxième fait est qu'un déversement par-dessus l'ouvrage partiellement terminé n'est généralement pas catastrophique et peut même être prévu dès la conception de l'ouvrage.

On a pu constater différentes approches dans le développement de la technologie des barrages BCR; néanmoins, il y a une progression régulière dans l'établissement d'une technologie pratique. Le présent chapitre décrit les dernières tendances dans le domaine de la construction aux États-Unis.

3.3.2. Catégories de barrages en BCR

Il existe trois variantes de barrages en BCR construits jusqu'ici et toutes les trois ont des particularités qui leur sont propres. On peut les grouper de la façon suivante : (1) le barrage Willow Creek [60, 63] et les modifications introduites ensuite sur les barrages Winchester, Middle Fork [6, 51], Galesville, Copperfield [43], et autres; (2) les barrages RCD japonais [32, 33] et (3) le barrage Upper Stillwater [15, 50]. L'Annexe présente une liste de barrages BCR et RCD qui sont terminés ou en cours de construction.

L'expérience de Willow Creek a donné naissance à un certain nombre de barrages qui sont actuellement en cours de construction et qui, sous différents aspects, ont une conception améliorée. La plupart ont des dosages en ciment relativement bas et tous ont des dispositifs pour maîtriser les fuites aux joints horizontaux. Certains comportent aussi des dispositifs pour évacuer les percolations avant qu'elles n'apparaissent sur le parement aval.

Le barrage du type Willow Creek met en œuvre un mélange très maigre de matériau sans « slump » décrit comme étant « un gravier humide mélangé à du ciment » [63]. Sous bien des aspects, il a été traité comme un barrage en remblai. Une telle approche avait été suggérée par Lowe (1962) [42] et Raphael (1970) [56]. Avec un dosage en liant faible, il reste peu de mortier ou de pâte pour assurer une liaison imperméable au niveau des joints de reprise horizontaux [59]; il en résulte que les percolations peuvent se frayer un passage entre les levées comme cela est arrivé au barrage Willow Creek. Les barrages du type Willow Creek construits ultérieurement comportent des couches de béton spécial entre les levées près du parement amont pour réduire les percolations.

Le barrage Elk Creek comporte un lit complet de mortier entre les couches successives [35]. Chaque levée du barrage Upper Stillwater est scellée par la pâte qui se trouve en excès dans le BCR. La quantité de pâte en excès dans le mélange « maigre » du barrage Stillwater (environ 246 kg/m³ de liant comportant 70 % de cendres volantes à faible chaleur d'hydratation) est estimée à 5 à 7 %. Cela constitue un joint excellent, comme le démontrent les essais faits par l'US Army Corps of Engineers [59] et l'US Bureau of Reclamation [15].

Il existe peu de similitudes entre le procédé de bétonnage traditionnel des barrages et celui des barrages BCR. L'expérience acquise durant la construction du barrage Willow Creek a montré une économie de coût de l'ordre de 50 % par rapport au coût prévu pour un ouvrage similaire de conception traditionnelle. Cet ouvrage

latter point is based upon two premises, the first being that river diversion is simplified with concrete dams as compared with earth and rockfill dams because short conduits through the mass can be used rather than long, costly diversion tunnels through the abutments; and secondly, overtopping of the partially completed structure is usually not catastrophic and, in some cases, is planned for during design.

In the development of RCC dam technology there have been differences of approach; however, steady progress is being made in establishing a practical technology. This section describes the most recent trends in construction in the USA.

3.3.2. Categories of RCC dams

There are three main variations of RCC dams built so far, and construction of each has its own peculiarities. They can be grouped as follows : (1) the Willow Creek Dam [60, 63] and subsequent modifications, as represented by Winchester, Middle Fork [6, 51], Galesville, Copperfield [43], and other dams; (2) the Japanese RCD dams [32, 33], and (3) the Upper Stillwater Dam [15, 50]. The Appendix contains summaries of RCC and RCD dams completed or under construction.

From the Willow Creek experience have come a number of dams which are now under construction and which, in various ways, have improved designs. Most have relatively low cement contents and all have measures to control leakage at the horizontal joints. Some also have measures to carry seepage away before it has an opportunity to surface at the downstream face.

The Willow Creek type of dam uses an extremely lean mixture of no-slump material described as " a damp gravel fill blended with cement " [63]. Its treatment is similar to that of an embankment dam in many respects. Such an approach was suggested by Lowe (1962) [42] and Raphael (1970) [56]. With the lean cementitious material content, there is little mortar or paste left over to provide for an impervious bond at the horizontal construction joints [59] and, as a result, seepage can pass between lifts as happened at Willow Creek Dam. Later dams of the Willow Creek type require bedding mixtures between lifts near the upstream face to restrain seepage.

Elk Creek Dam has complete mortar coverage between successive layers [35]. Upper Stillwater Dam relies upon excess paste within the RCC mixture to seal each lift. The excess paste in the Stillwater " lean " mixture with approximately 246 kg/m^3 (415 lb/yd^3) of cementitious material is estimated at 5 to 7 %. Seventy percent of the cementitious mixture is fly ash with low heat of hydration. This should result in an excellent joint, as shown in tests by both the US Army Corps of Engineers [59] and the US Bureau of Reclamation [15].

Little similarity exists between the process of conventionally placed concrete dams and that of RCC dams. Experiences gained during the construction of Willow Creek Dam showed a cost savings on the order of 50 % based on costs for a similar structure conventionally built. This particular design used a very conservative

présentait une section très classique répondant aux critères de sécurité même en admettant une percolation et une sous-pression totale sur la surface de chaque levée.

La construction du barrage Upper Stillwater, aux États-Unis, a commencé durant l'été de 1985 et s'est prolongé au cours de 1987. En plus d'une mise en place continue du BCR dans l'ouvrage, ce barrage est caractérisé par une conception très différente pour la construction des parements amont et aval. Une « machine à paver », à coffrage glissant, met en place une suite continue de bordures horizontales à l'avant du BCR. Ces éléments sont en béton traditionnel avec entraîneur d'air et ont pour but de contenir le BCR interne. Sur le barrage Willow Creek, les constructeurs ont utilisé des panneaux préfabriqués, des coffrages traditionnels et des parements aval non coffrés.

3.3.3. Organisation de la construction

Les dispositions générales et les travaux de construction d'un barrage BCR suivent un modèle tout à fait différent de la méthode habituelle utilisée pour un béton de masse classique. Au lieu de réaliser une construction verticale par plots monolithiques quasiment indépendants, la mise en place du béton se fait horizontalement en superposant de grandes levées peu épaisses. Lorsqu'une levée pose un problème particulier, il doit être résolu avant la pose des levées suivantes. Il n'existe pas de plots monolithiques alternatifs sur lesquels on peut travailler pendant qu'un problème est étudié. Il est très important d'examiner et programmer à l'avance toutes les activités annexes, telles que le nettoyage des fondations, les accès, et l'assemblage des matériels et des parties noyées dans le béton. Lorsqu'apparaissent des problèmes techniques, la responsabilité et l'autorité pour les actions à mener dans le cadre des spécifications doivent relever de l'organisation du chantier.

Étant donné que le rythme global de production du BCR peut être très élevé, la limitation de la fissuration thermique peut réduire les périodes de l'année durant lesquelles le bétonnage est possible et la cadence même de celui-ci. Par exemple, sur le barrage Willow Creek, la mise en place a été limitée à un maximum de 3 levées toutes les 24 heures, en évitant aussi les heures chaudes de la journée. Sur le barrage Galesville, aux États-Unis, le bétonnage a été limité à 4 levées de 300 mm, par jour. Les cadences varient selon les conditions climatiques et doivent être prises en considération lors de l'élaboration du programme de travaux. Par contre, durant certaines périodes de l'année, il peut ne pas y avoir de restriction pour les cadences de bétonnage. De toute façon, le programme de mise en place des levées sera étudié de façon précise et les contrôles assureront qu'il répond bien aux exigences d'ordre thermique.

La disposition générale et l'emplacement de la centrale de production doivent minimiser les besoins en énergie, que le BCR soit transporté par tapis ou par véhicules. Les distances complètes de transport, les manipulations verticales, ainsi que l'exposition du béton frais au soleil ou aux aléas climatiques doivent être réduites au minimum. Si le béton est transporté par véhicules, la centrale à béton devra avoir été construite sur une hauteur de façon que les pertes et l'eau de lavage s'évacuent sans formation de boue. Souvent, la centrale peut être installée dans la future retenue juste en amont du barrage, au-dessus du niveau du batardeau, ou encore sur un des appuis.

Le ravitaillement des engins en carburant, la construction des coffrages et l'assemblage des éléments à noyer dans le béton doivent être étudiés et programmés

section which would meet safety criteria even with anticipated seepage and full uplift over the entire surface of each lift.

Construction of Upper Stillwater Dam, USA, began in the summer of 1985 and continued through the 1987 construction season. In addition to the continuous placing of RCC in the structure, the dam features a different concept for construction of the upstream and downstream faces. A slip-form paving machine places a stacked series of continuous horizontal curbs ahead of the RCC lift placement. These curbs are constructed of conventional air-entrained concrete and serve to encase the interior RCC. The Willow Creek Dam used pre-cast panels, traditional forming, and unformed downstream slopes.

3.3.3. Construction planning

The layout and operations for construction of an RCC dam follow a considerably different pattern from those normally used for placing conventional mass concrete. Instead of vertical construction with nearly independent monolithic blocks, the placement follows a horizontal spread, stacking large expanses of thin horizontal lifts on top of each other. When a problem develops on a given lift, it must be resolved before any subsequent lifts can be placed. There are no alternate monolithic blocks on which to work while a problem is studied. It is important that all related activities such as foundation cleanup, access, and assembly of materials and embedded parts be planned and scheduled ahead of time. When problems of an engineering nature develop, responsibility and authority to act within specifications must reside in the field organization.

Because the overall production rate of RCC can be very high, controls to limit thermal cracking may restrict the time of year that placement is permissible and the rate of placement; for instance, at Willow Creek Dam, placement was limited to a maximum of three lifts each 24 hours avoiding also placement during the heat of the day. At Galesville Dam, USA, placement was limited to four lifts per day of 300 mm (12 in). Placement rates will vary with climatic conditions and must be considered in construction scheduling. Conversely, during certain times of the year, unrestricted placing rates may be permissible. In any case, lift scheduling must be precisely planned and controlled consistent with thermal requirements.

The plant layout and location should minimize energy requirements whether the RCC is transported by conveyor or hauled in vehicles. Overall haul distances, vertical lift, and exposure of the fresh concrete to sun and weather must be minimized. If vehicular haul is used, the plant should be on a raised area so that spillage and wash water drain away without creating mud. The plant can often be located in the future reservoir just upstream of the dam above the cofferdam level, or on one of the abutments.

Fueling of equipment, construction of forms, and assembly of embedded items should be planned and scheduled so that the majority of work can be done off the

de sorte que la plus grande partie du travail puisse être effectuée ailleurs que sur le barrage ou, si nécessaire, sur une levée durant les temps morts de changements d'équipes. Pour des raisons de sécurité, d'efficacité et de réduction maximale de la pollution, tous les véhicules et personnel non indispensables devront être écartés des zones de bétonnage et de circulation des engins.

3.3.4. Méthodes de fabrication et de mise en place du BCR

3.3.4.1. Production des granulats

Étant donné que de nombreux BCR ont tiré profit de leur importante teneur en éléments fins (passant 75 µm au tamis n° 200) pouvant aller jusqu'à environ 10 % du poids, la production des granulats pour le BCR peut être moins contraignante que pour le béton traditionnel. Les graviers naturels peuvent souvent être utilisés avec un simple écrêtage des gros éléments. Dans la pratique britannique, ces matériaux sont dits « matériaux tels qu'ils ont été extraits ». Les granulats de dimension maximale (MSA) peuvent varier d'un chantier à l'autre. Willow Creek a utilisé des granulats de 76 mm, Tamagawa du 152 mm, le chantier de Tarbela a mis en œuvre un MSA de 152 mm pour les 352 000 m³ de travaux de réparation des tunnels et un MSA de 152 mm pour les 2 320 000 m³ des bassins de dissipation de l'évacuateur de crue.

Lorsqu'ils sont extraits d'une carrière, le traitement des granulats peut également être réduit et ne consister qu'en un premier concassage avec relativement peu de concassage secondaire et aucun lavage, comme cela a été utilisé sur le barrage Willow Creek. Sur ce chantier, les granulats étaient obtenus par concassage à partir de basalte, et pratiquement un tiers du matériau fourni au concasseur était du gravier silteux et sableux.

Le stockage des granulats et l'implantation de la centrale à béton peuvent être plus délicats que pour le béton traditionnel. Souvent, des stockages dépassant la moitié des quantités nécessaires à une saison de bétonnage peuvent être nécessaires avant même que ne débute la mise en place du BCR. Cela peut résulter d'un projet qui conduit à la production de granulats durant la saison froide, de sorte qu'un matériau pré-refroidi est disponible pour une utilisation ultérieure. L'autre raison qui plaide en faveur d'une production anticipée de granulats est que la consommation de granulats durant la mise en place du BCR peut fort bien dépasser la cadence maximale de production de granulats.

L'emplacement, la taille et la forme des stocks de granulats seront adaptés à l'emplacement de la centrale à béton et à la méthode d'approvisionnement. Les cadences de production exigées par les bétonnières sur les grands chantiers de BCR sont tout à fait exceptionnelles par rapport aux cadences de production d'un béton classique. Par exemple, plusieurs engins chargeurs peuvent remplir les trémies d'alimentation en granulats simultanément, lorsque des bandes transporteuses ne sont pas employées. La longueur des trajets, le procédé de déchargement et tout demi-tour des engins doivent être programmés avec soin pour que le travail soit exécuté avec efficacité et en toute sécurité, en synchronisme avec la centrale à béton et les réserves de granulats.

dam or, if necessary, from the top of a lift during shift changes and down time for the placing crew. For safety, efficiency, and minimal contamination, all unnecessary vehicles and personnel should be kept out of the placing areas and equipment paths.

3.3.4. RCC production and placing methods

3.3.4.1. Aggregate production

Because many RCC mixtures have benefited from having a high content of fines [passing 75 μm (No. 200) sieve] in a range up to about 10 % by weight, aggregate development can be less restrictive than for conventional concrete. Natural gravels often may be used with only the oversize scalped off. In British practice, these conditions are referred to as using “as-dug” material. Maximum size aggregates vary from job to job. Willow Creek used 76 mm (3 in), Tamagawa used 152 mm (6 in), and the Tarbela project used 152 mm (6 in) MSA for the 352 000 m³ (460 000 yd³) tunnel repair work and 152 mm (6 in) MSA for the 2 320 000 m³ (3 004 000 yd³) spillway plunge pools.

Where a quarry operation is necessary, aggregate processing may also be minimal, consisting of primary crushing with relatively little secondary crushing and no washing, as was done at Willow Creek Dam. There the aggregate was crushed from basalt, and up to about one-third of the raw feed to the crusher was silty, sandy gravel.

Aggregate stockpiling and concrete plant location can be more critical than those in conventional placing practice. Typically, very large stockpiles that could exceed half of the material needed for a season of placement may be required prior to the start of RCC placing. This may be necessitated by designs which require aggregate production during cold weather so that precooled material is available for later use. Another important reason for early aggregate production is because the rate of aggregate usage during RCC placing may well exceed the maximum rate of aggregate production.

The location, size, and shape of the aggregate piles must be coordinated with the concrete plant location and the method of feed. The production rates required by the mixers on large RCC jobs are unusual when compared to conventional concrete production. Several loaders, for instance, can be simultaneously filling the aggregate feed bins if conveyors are not employed. The lengths of haul, dumping procedures, and turnarounds need to be carefully planned for equipment to operate efficiently and safely in conjunction with the mixing plant and the aggregate stockpiles.

3.3.4.2. *Dosage et malaxage*

Le BCR peut être produit aussi bien par gâchées qu'en continu. Des conditions techniques importantes sont requises pour fournir une capacité adaptée aux cadences élevées de mise en place et pour malaxer les composants afin d'obtenir un mélange uniforme. Sur le plan pratique, la bétonnière doit fonctionner pendant des périodes prolongées avec peu ou pas de baisse de cadence de production. Toutes les réparations doivent être effectuées rapidement. Étant donné que les BCR sont assez rugueux, les tambours et les chambres de malaxage doivent être conçus pour résister à la formation de béton dans les recoins.

Les bétonnières à fonctionnement continu produisent souvent plus de béton que les installations discontinues. Les installations continues peuvent actuellement assurer la même qualité que les centrales discontinues. Les bétonnières continues du type « malaxeur à argile » ont été employées avec succès pour le BCR. De tels malaxeurs, pour des granulats de 76 mm et plus, doivent être conçus et fabriqués avec beaucoup de soin en pensant à leur entretien. De nombreux malaxeurs de ce type, adaptés à l'asphalte et aux matériaux d'assise des routes, n'ont pas pu produire de manière continue un BCR adapté aux barrages, alors que des malaxeurs spécialement conçus ont donné de très bons résultats. Les bétonnières continues à tambour ont été utilisées avec succès avec des granulats de dimension maximale 152 mm, à Tarbela. Les bétonnières à tambour, type discontinu, qui sont employées avec de gros granulats pour un béton traditionnel peuvent également être utilisées pour les gros granulats du BCR, mais le « foisonnement » du mélange peut réduire la capacité du tambour-mélangeur de 10 à 15 %.

Des bétonnières portées ont été utilisées avec succès pour des petits granulats (taille maximale de 25 mm) et pour des planches d'essais lorsque d'autres matériels n'étaient pas disponibles. Néanmoins, l'utilisation de granulats supérieurs à 38 mm produit une forte ségrégation et un malaxage insuffisant.

Le fait d'introduire les granulats et les liants en « ruban » ou en « série » dans la bétonnière est un facteur qui diminue le temps de malaxage et la formation de béton collant à l'intérieur de la machine. Le moment exact et l'angle d'introduction de l'eau dans les mélanges sont également importants. Chaque centrale à béton et chaque mélange peuvent présenter des exigences spécifiques pour le BCR, qui ne peuvent être déterminées que par des essais et élimination d'erreurs. Sur le barrage Willow Creek, par exemple, un sable fin pouvait être ajouté et mélangé avec efficacité, à condition qu'il soit le premier matériau mis en place sur le tapis de chargement; cependant, ajouté sur le sommet des autres granulats, il rendait le mélange peu satisfaisant et provoquait la formation de bouchons de béton dans la bétonnière. En règle générale, c'est le contraire que l'on fait pour le béton traditionnel.

Lors de la définition des travaux et des matériels, il faut prendre en considération la précision souhaitée pour la centrale à béton et le niveau de contrôle du mélange pendant la fabrication du béton. Des mesures rigoureuses et une faible variabilité, lorsqu'elles sont requises, peuvent être obtenues pour le BCR. La même précision en matière d'installations, le même niveau d'essais et les mêmes normes de dosage utilisés pour le béton traditionnel peuvent être également adoptés pour le BCR. Néanmoins, il peut y avoir des cas d'applications particulières, pour lesquels une telle rigueur n'est pas indispensable. Dans ces cas assez rares, il est possible de faire une économie supplémentaire et de simplifier les opérations. Par exemple, les

3.3.4.2. *Batching and mixing*

Both batch type and continuous feed systems of mixing may be used for producing RCC. Important technical requirements include providing sufficient capacity for the typically high placing rates and blending the ingredients into a uniform mixture. From a practical standpoint, the mixer must operate for extended periods with little or no down time. Repairs must be made rapidly. Since RCC mixtures are relatively harsh, the drums and mixing chambers should be designed to resist buildup of concrete in recessed corners due to the dry mixture.

Continuous mixers often provide higher output capability than batching-type plants. Sophisticated continuous plants now can provide the same degree of control found in batching operations. Continuous mixers of the pug mill type have been successfully used with RCC. Pug mills for 76 mm (3 in) and larger aggregate sizes must be carefully designed and constructed with maintenance in mind. Many pug mills suited for asphalt and roadbase materials have not been able to provide reliable and continuously adequate mixing of RCC for dams, whereas specially designed pug mills have performed very well. Continuous drum mixers have been used successfully with 152 mm (6 in) maximum size aggregate at Tarbela. Batch-type drum mixers capable of handling large aggregate for conventional concrete can also be used for large aggregate RCC, but "bulking" of the mixture may reduce the capacity of the mixer drum by 10 to 15 %.

Truck mixers have been used successfully for small aggregate RCC having a maximum size of 25 mm (1 in) and for trial placements when other equipment was not available. However, severe segregation and poor mixing result with use of aggregates over 38 mm (1-1/2 in) in size.

Proper "ribboning" or sequencing of the aggregates and cementitious material as they are fed into the mixer is an important factor in minimizing mixing time and internal sticky concrete buildup. The exact timing and angle of introducing water into batched mixtures are also important. Each plant and mixture may have peculiar requirements for RCC which can be determined only by trial and error. At Willow Creek Dam, for example, a fine blend sand could be added and mixed efficiently if it was the first material ribboned onto the charging belt; however, when it was added on top of the other aggregates, inadequate mixing and severe buildup in the mixer resulted. Generally, the opposite sequence would be used for conventional concrete.

The desirable accuracy of the concrete plant equipment and the degree of control of the mixture during production are matters to be considered when specifying the job and equipment. When exacting measurements and low variability are required, they can be provided in RCC mixtures. The same plant accuracy, degree of testing, and mixture proportioning standards used in conventional operations can be provided for RCC. However, there may be cases when, for a specific application, such exacting requirements are not needed. In these limited cases, additional economy and simplicity can be achieved. For example, limits of scale accuracy for the water, cement, and fly ash at Willow Creek Dam were $\pm 4\%$

tolérances de dosage pour l'eau, le ciment et les cendres volantes au barrage Willow Creek étaient de $\pm 4\%$ en poids, au lieu de $\pm 1\%$ pour le béton traditionnel. Les tolérances pour les granulats étaient de 4% au lieu du 2% classique [74]. L'eau était ajoutée en volume. Dans le cas du barrage Willow Creek, on a ainsi obtenu un ouvrage satisfaisant aux conditions imposées par le projet.

Des ajustements mineurs concernant la teneur en eau durant le bétonnage peuvent être effectués immédiatement à la centrale sur demande du chef de chantier ou du contrôleur sans ajustement des autres dosages en poids. L'ajustement théorique associé aux variations de teneur en eau se fera dans les limites pratiques de précision. Par exemple, la teneur en air d'un BCR présentant une granulométrie convenable et correctement compacté est de 1 à 2% et pourra varier généralement à l'intérieur de cette fourchette. Les ajustements en matière de teneur en eau seront de l'ordre de $1/2$ à 1% [55].

Durant les premiers temps de fonctionnement d'une nouvelle centrale à BCR, il faut prévoir un excès de demande d'eau jusqu'à ce que l'ensemble de l'installation soit bien humidifié et que les cadences de production prévues soient atteintes. Au fur et à mesure que le fonctionnement de la centrale se stabilise, le responsable du bétonnage ou le contrôleur peuvent demander une réduction de la quantité d'eau correspondant aux conditions de mise en place du moment.

3.3.4.3. *Transport et mise en place*

Tout le cycle de malaxage, de transport et de mise en place du BCR doit être accompli le plus rapidement possible avec un minimum de reprises. Les conditions locales rencontrées sur les chantiers fixeront les durées limites de toutes ces opérations, mais une règle empirique à appliquer est que le déchargement doit être exécuté dans les dix minutes suivant le malaxage initial, l'épandage dans les dix minutes après le déchargement et le compactage dans les dix minutes après l'épandage.

Les deux principaux moyens de transport du BCR sont les tapis et les camions. Pour les tapis qui ne sont pas conçus pour atteindre et alimenter en continu l'endroit de l'épandage du BCR et couvrir la surface entière de la levée, une trémie de stockage provisoire pour le BCR malaxé peut devenir nécessaire à l'extrémité du tapis principal. Ce procédé permet à la bétonnière de fonctionner et de décharger sans discontinuité, tout en attendant l'arrivée du camion. Avec ce système, un tapis apporte le BCR jusqu'à la trémie qui se trouve sur la surface de la levée du barrage et qui avance au fur et à mesure de la progression du barrage. Les camions de transport restent sur le barrage et chargent le béton à partir de la trémie. Cette dernière permet d'avoir toujours du béton frais pour remplir les camions et d'éviter les arrêts et démarrages qui ne sont pas souhaitables dans une installation de malaxage à fonctionnement continu. Ce système empêche également les véhicules d'apporter des éléments de contamination sur le barrage. La taille minimale de la trémie correspond à environ deux fois la capacité du plus grand camion utilisé. Le matériau ne doit pas être conservé dans la trémie de stockage pendant plus de cinq à dix minutes, bien que certaines exceptions soient autorisées si le matériau n'a pas déjà commencé à sécher et s'il est ensuite rapidement déchargé, épandu et compacté.

L'utilisation de tapis transporteur à vitesse élevée et à fonctionnement continu, allant directement jusqu'à l'emplacement du bétonnage, est une méthode de transport tout à fait efficace. La durée d'exposition du béton sur les tapis doit être réduite

by weight instead of the $\pm 1\%$ restriction for conventional concrete. Aggregates were allowed to vary within a 4% range as well, instead of the conventional 2% [74]. Water was added volumetrically. In the case of Willow Creek Dam, a structure meeting design requirements was adequately obtained.

Minor moisture adjustments desired during placing can be made immediately at the plant by request from the placing foreman or inspector without adjusting other batch weights for yield. The theoretical yield adjustment associated with production changes in moisture will be within the practical accuracy of the operation. For example, the air content of properly graded and compacted RCC is 1 to 2% and will vary routinely within that range. Moisture adjustments will be in the order of 1/2 to 1% [55].

During the first runs of a newly established RCC plant, higher water demands should be anticipated until all the equipment is wetted and the planned rate of production is achieved. As the plant operation stabilizes, the placing foreman or inspector can then call for a reduction in water consistent with placing conditions at that time.

3.3.4.3. *Transporting and placing*

The entire process of mixing, transporting, and placing RCC should be accomplished as rapidly as possible and with minimal rehandling. Local conditions at job sites will affect the time limits for these operations, but a "rule of thumb" to follow is that dumping should be accomplished within 10 min of initial mixing, spreading within 10 min of dumping, and compacting within 10 min of spreading.

The two prime methods of transporting RCC are by conveyor belt and hauling vehicles. For conveyor systems which are not designed to reach and continuously place RCC over the entire lift surface, a temporary holding hopper or "gob hopper" for the mixed RCC may be necessary at the end of the main conveyor. This allows the mixers to operate and discharge continuously without interruption while waiting for a hauling vehicle. With this system, a conveyor delivers RCC to the gob hopper which is on the lift surface of the dam and moves up as the dam is built. Hauling vehicles remain on the dam and load from this hopper. The hopper ensures that hauling vehicles will always have a fresh load of RCC available and avoids start-stop operations which are highly undesirable with continuous mixing plants. It also precludes vehicles tracking contamination onto the dam. A minimum gob hopper size is approximately twice the capacity of the largest hauling vehicles to be used. Material should not be retained in the storage hopper for more than about 5 to 10 min, although occasional exceptions may be permitted if the material has not begun to dry out and if it is subsequently placed, spread, and rolled expeditiously.

The use of continuous high-speed conveyor belt directly to the point of placing is an effective transporting method. Exposure time on the conveyors should be minimal, with no more than 5 min being preferred and 10 min being a practical

au minimum, avec une durée souhaitable de cinq minutes et une limite maximale de dix minutes. Pour les longs parcours et si possible pour l'ensemble de l'installation, les tapis seront couverts pour protéger le béton de la pluie et pour l'empêcher de sécher. Le système de tapis sera conçu spécialement pour le BCR qui est le plus utilisé et qui est en général un mélange maigre de gros granulats pour la presque totalité du corps du barrage. De même que pour les bétonnières du type « malaxeur à argile », toute une gamme variée de tapis est disponible; mais pour une utilisation continue et fiable, seul un matériel durable et ayant fait ses preuves sera utilisé.

Le système de tapis à vitesse élevée et à fonctionnement continu peut augmenter les cadences de bétonnage de façon substantielle et réduire de façon significative les besoins en autres matériels. La Fig. 11 indique la productivité moyenne réalisable pour des largeurs réduites de barrages lorsque l'approvisionnement en béton se fait entièrement par tapis et lorsque des camions sont utilisés sur le barrage. Sans les tapis, la productivité est réduite à des niveaux presque intolérables sur les sections étroites du sommet du barrage. La Fig. 11 a été établie à partir de temps de circuit de distribution, recueillis sur plusieurs chantiers. Cependant, les données de la Fig. 11 représentent au mieux une base grossière, et chaque cas doit être analysé de façon approfondie et apprécié par les projeteurs et les constructeurs.

En plus des principaux avantages présentés par le tapis transporteur (aucune étrémie, approvisionnement rapide, moins d'engorgement, aucune piste de transport, moins d'entretien, aucune détérioration des surfaces de levée par les véhicules de transport, productivité améliorée), le tapis peut aussi servir de chemin d'accès et de support pour l'éclairage et l'amenée d'eau, d'air et d'électricité à la zone de bétonnage. On a également projeté d'utiliser le tapis transporteur pour supporter une enceinte couverte servant de protection contre la pluie et le soleil.

En ce qui concerne les tapis transporteurs pour BCR, une attention spéciale doit être portée aux largeurs, vitesses, angles, protection, entretien, système de support, pièces de rechange. Des raclours seront prévus pour enlever les matériaux indésirables en tête de chaque tronçon de tapis, et des séparateurs à chicanes ou autres dispositifs sont essentiels pour empêcher la ségrégation aux points de transfert.

Aux États-Unis, une règle empirique est parfois appliquée, selon laquelle pour plus de 300 000 m³ le tapis est plus économique que les camions. Cela suppose que des nouveaux engins sont achetés et que des pistes de chantier sont utilisables. Le point d'équilibre dépend de facteurs, tels que la configuration du barrage et les difficultés d'accès. Compte tenu de la disponibilité des engins de transport utilisés qui ne demandent aucune modification pour un emploi immédiat, il y a une tendance à utiliser des camions sur les grands chantiers plutôt que des tapis. Par contre, un tapis transporteur a été utilisé sur le barrage Middle Fork, de 38 000 m³, à cause des difficultés d'accès par route. Le tapis alimentait un chargeur sur roues, à benne frontale, qui apportait le BCR tout le long des 121 m de l'ouvrage.

Les véhicules de transport peuvent être à déchargement arrière ou par le fond, ou des scrapers-tracteurs sur roues, ou encore des grands chargeurs à benne frontale. Du fait de la densité élevée du BCR, le poids plus que la capacité volumétrique du véhicule dictera vraisemblablement la quantité de matériau qui sera transportée à chaque voyage, même en tenant compte de l'effet de foisonnement. Les engins qui se déchargent par le fond réduisent la ségrégation, l'épandage et la hauteur de chute du matériau. Les scrapers-tracteurs sur roues sont encore meilleurs parce qu'ils combinent déchargement et réglage, et étalent le mélange en une couche relative-

limit. A covered conveyor to protect the concrete from drying and from rain should be required for all long sections and preferably for the complete system. The conveyor system should be specifically designed for RCC of the major type being used, which will usually be a lean mixture of large aggregate for most of the dam mass. As with pug mill mixers, a variety of conveyors is available; but for continuous reliable use with RCC, only very durable equipment with proven performance should be considered.

The continuous high-speed conveyor delivery system can substantially increase placing rates and significantly reduce other equipment needs with their related labor costs. Fig. 11 indicates the achievable average productivity that can be expected for reduced dam widths when delivery is totally by conveyor and when trucks are used on the dam. Without the conveyor, productivity reduces to almost intolerable rates in narrow sections at the top of the dam. Fig. 11 is based on a compilation of data to date at various projects and computed round-trip delivery times. Nevertheless, the data shown on Fig. 11 at best constitutes a rough base, and each case should be carefully examined and estimated by designers and constructors.

In addition to the main benefits of full conveyor delivery (no hoppers, fast delivery, less congestion, no haul roads, less maintenance, less labor, no lift surface damage from haul vehicles, improved productivity), the conveyor can also serve as an access walkway, as support for lights, and for conveyance of water, air, and electricity to the placement area. A plan has also been developed to use the conveyor as support for a roof enclosure protecting from rain and sun.

For conveyor systems for RCC, special attention should be given to belt widths, speeds, angles, protection, maintenance, backup systems, and spare parts. Belt scrapers should be provided to remove unwanted materials at the head of each belt section, and baffle plates or other devices are essential to prevent segregation at transfer points.

In the USA, a rule of thumb is sometimes used that for more than 300 000 m³ (400 000 yd³) the conveyor system is more economical than hauling units. This assumes new equipment is purchased and haul roads are practical. Where that break-even point is will depend on other factors as well, such as the configuration of the dam and difficulty of access. Because of the availability of used haul equipment that needs no modification for immediate use, there is a tendency to use hauling units on larger structures rather than conveyors. On the other hand, a conveyor was used at the 38 000 m³ (50 000 yd³) Middle Fork Dam because of road access limitations. The conveyor fed a front-end wheel loader which transported or "trammed" the RCC on this 121 m (400 ft) long structure.

Haul vehicles can be end-dump or bottom-dump trucks or wheel tractor-scrappers or large front-end loaders. Because of the high density of RCC, weight rather than the volumetric capacity of the vehicle will probably control the amount of material hauled per trip, even considering the bulking effect. Bottom dumps minimize segregation, spreading, and the drop distance. Wheel tractor-scrappers are even better because they force-feed while discharging and spread the mix into a relatively uniform layer. Scrapers also have the advantage of improved mobility over standard bottom dumps of the highway type, and they have less stress under the tires.

ment uniforme. Les scrapers ont aussi l'avantage d'avoir une meilleure mobilité par rapport aux dumpers à déchargement par le fond, du type chantier routier; de plus leurs pneus exercent des contraintes plus faibles.

Les dumpers à déchargement par l'arrière peuvent également être utilisés dans les zones inaccessibles et pour égaliser une fondation rocheuse irrégulière. Néanmoins, ils provoquent la ségrégation et laissent derrière eux des tas assez importants de matériaux qui doivent être étalés. Dans les zones particulièrement difficiles et là où les fondations initiales présentent des trous profonds, un chargeur sur roues et à déchargement frontal peut être utilisé pour accéder à la zone de bétonnage et y décharger le matériau. Le travail est lent, mais cela peut être la seule solution pratique pour certains épandages initiaux dans quelques zones ou pour des travaux relativement peu importants.

Sur le barrage Upper Stillwater, aux États-Unis, dans une opération à grande échelle, des dumpers à déchargement arrière et munis d'épandeurs à « hayon » fabriqués sur le chantier ont été utilisés au début pour transporter le matériau sur la surface de levée à partir d'un tapis. Des épandeurs fixés aux camions et des épandeurs du type « Jersey » fixés à des tracteurs sur chenilles n'ont pas donné satisfaction sur d'autres chantiers avec des dimensions de granulats identiques à celles utilisées pour la construction d'un barrage. Ils manquent aussi de mobilité et peuvent produire une série de joints ou de plans longitudinaux et verticaux affaiblis, résultant d'une sorte de pavage en bandes. Néanmoins, un système de coffre épandeur-répartiteur fabriqué sur le chantier et fixé sur un véhicule sur chenilles modifié a donné satisfaction au barrage Galesville, bien qu'il constituât une unité s'ajoutant aux engins de construction [21].

La meilleure technique pour répandre le BCR est de pousser le front de chaque couche en progressant d'une rive à l'autre. Cette technique n'est pas à utiliser pour des matériaux spéciaux, tels ceux utilisés pour les parements amont ou aval. Dans de tels cas, il est préférable de laisser à découvert pendant vingt minutes environ les zones qui vont recevoir le mélange spécial, pendant que la mise en place se poursuit au centre. Ces zones peuvent alors recevoir le béton et être compactées pour être liées à la levée de BCR placée précédemment dans la zone centrale, dans les 30 minutes après la mise en place de cette levée. La bande de matériau spécial peut alors être mise en place et compactée au-delà du front de la levée centrale, à condition que la couche suivante de la zone centrale soit placée et compactée pour être liée à la bande de matériau spécial dans les trente minutes environ. Si l'interface des deux bétons ne peut être compactée dans ces limites de temps, le rebord exposé devra alors être adouci et compacté avant que ne soit mis en place le mélange adjacent. Selon les spécifications du projet, l'ingénieur évaluera si un mélange enrichi est nécessaire entre les deux matériaux. Le mélange enrichi utilisable peut être réalisé en béton traditionnel avec des granulats de 19 mm au maximum (se reporter au paragraphe 3.1.7. pour toutes considérations supplémentaires).

Si des véhicules sont utilisés pour transporter le BCR, une étude préliminaire approfondie du réseau routier devra être entreprise. Parmi les éléments restrictifs qui peuvent empêcher le transport par route jusqu'au barrage, il y a la raideur des versants, le manque de matériaux de construction pour routes, l'emplacement de la centrale à béton, les contraintes d'environnement. Si la centrale à béton est située en amont du barrage, le passage de la route au travers de la zone amont devra être étudié en détail. Il se peut que cette méthode ne soit pas très pratique pour certains projets où le traitement du parement amont ne permet pas l'accès par une route.

End dumps may also be used as needed for inaccessible areas and to level off a rough bedrock foundation. However, they promote segregation and leave relatively large piles of material which must be spread. In extremely rough areas and where the initial foundation area has deep holes, a front-end wheel loader can be used to reach the placement site and to deposit material. This results in a slow operation, but it may be the only practical solution for initial placements at some locations or for a relatively small-scale operation.

At Upper Stillwater Dam, USA, in a large-scale operation, end dumps with job-built "tail-gate" spreader boxes were initially used to transport material on the lift surface loading from a conveyor belt. Spreader boxes attached to dump trucks and "Jersey spreaders" attached to track-type tractor equipment have not worked well at other locations with the aggregate sizes typical of dam construction. They also lack mobility and can result in a series of joints or weakened vertically oriented longitudinal planes within the dam caused by paving lanes. However, a job-built spreader box system mounted on a modified tracked vehicle was used at Galesville Dam with good results, although it added an additional unit of equipment to the operation [21].

The preferred technique of placing RCC is to push an advancing face or front of each layer, progressing from one abutment toward the other. An exception to this procedure is where special materials are used, such as at the upstream or downstream face of a dam. In such cases, it is practical to leave the areas to receive the special mixture uncovered for about 20 min while the interior placement advances. Then the areas which have been left to receive the special mixture can be filled and rolled into the previously placed interior RCC lift within about 30 min after the interior RCC lift was placed. The lane of special material can then be placed and compacted beyond the face of the interior lift, providing that the interior is then placed and rolled into the lane of special material within about 30 min. If the interface of the two mixtures cannot be rolled within such time limits, the exposed edge should be "rolled down" and compacted prior to placing the adjacent mixture. Depending on requirements of the structural design, the engineer should evaluate whether an enriched bedding mixture is needed between the two primary materials after the edge has been rolled down. Such an enriched mixture might consist of 19 mm (3/4 in) maximum size aggregate in conventional concrete. Refer to Section 3.1.7., for additional discussion.

If haul units are considered for transporting RCC, a thorough preliminary study should be made of the haul road network. Restrictions which may prevent hauling to the dam by road include steep terrain, lack of available road building material, plant location, schedule, and environmental considerations. If the concrete plant is located upstream of the dam, the method of bringing the road through the upstream face area needs to be planned in detail. This approach may not be practical for some designs where treatment of the upstream face does not permit road access.

Du point de vue de la programmation des travaux, la surélévation des routes pour qu'elles restent au niveau du barrage peut demander tellement de temps que cela devient de plus en plus inefficace au fur et à mesure que s'accélère la montée de l'ouvrage. Afin d'éviter le ralentissement des opérations de bétonnage, il faut surélever les routes pendant les deux heures de fermeture journalière du chantier, pendant les travaux d'entretien et autres opérations.

Les routes d'accès doivent pénétrer sur le barrage avec un angle en plan qui sera le plus grand possible afin de minimiser les dégâts qui peuvent être causés par les pneus sur la surface de la levée de béton. Si un virage à angle droit est indispensable à partir des routes perpendiculaires au parement du barrage, il en résultera des usures et autres dégâts. Les camions devront tourner lentement suivant le rayon le plus grand possible. Dans la mesure du possible, la chaussée devra être réalisée en enrochement ou en gravier propre et drainant. Les derniers tronçons des routes pénétrant sur le barrage devront être revêtus d'un matériau permettant aux camions de garder des pneus propres pour éviter de contaminer la surface du BCR. Il est conseillé d'installer, à cet endroit, un système de nettoyage des pneus. Un supplément de BCR qui mord sur la route ne suffit pas à garder propre la surface de levée mise en place. La propreté de la surface de chaque levée de béton est si importante qu'il est nécessaire de poser un revêtement complet sur toutes les routes et les surfaces de stockage, par exemple, dans les zones de sol de latérite.

Quelle que soit la méthode de transport, le BCR doit généralement être déchargé le plus près possible de l'endroit où il va être mis en place sur la levée. Les scrapers et les dumpers qui se vident par le fond ont l'avantage de pouvoir déposer le matériau en couche au fur et à mesure qu'ils avancent. Lorsqu'il s'agit d'engins qui se vident par l'arrière, le matériau devra être déposé sur la nouvelle couche en cours de mise en place et non pas sur celle qui doit être recouverte. Ceci permet de retravailler le matériau déposé qui aurait pu subir une légère ségrégation, au fur et à mesure que les bulldozers le poussent vers l'avant. Du fait de la consistance normale très sèche du BCR, la ségrégation peut devenir sérieuse si le matériau est déposé en gros tas. Une règle générale consiste à limiter la hauteur à 600 mm; sinon, les granulats les plus gros rouleront jusqu'au bas du tas. Un étalement minutieux au moyen d'un bulldozer peut remélanger une bonne partie des éléments soumis à ségrégation, même sur des tas moins importants; mais cela s'avère presque impossible si les blocs ont roulé dans la couche qui avance. Si la mise en place se fait sur la nouvelle couche, un remélange peut être effectué au fur et à mesure que le matériau est repoussé vers l'avant.

Ainsi que le montre la Photo 1, les bulldozers sont en général équipés de chenilles sans barres d'attaque et laissent derrière eux une surface plane, horizontale ou à l'inclinaison requise par les plans, bien que les chenilles avec barres d'attaque produisent un meilleur compactage. Des pentes peuvent être adoptées pour diverses raisons, par exemple pour le drainage : 20 H (horizontal) pour 1 V (vertical) jusqu'à 50 H pour 1 V. Une pente de 15 H pour 1 V peut être considérée comme maximale pour la mise en place du BCR lorsque des rouleaux vibrants sont employés pour un compactage transversal à la pente. Le rouleau doit compacter la levée seulement lorsqu'elle a été convenablement étalée. Des stries ou des redans entre des passages adjacents de la lame du bulldozer peuvent provoquer un compactage irrégulier. En règle générale, le fait d'avoir une surface bien plane prête à être compactée dans le laps de temps le plus court est plus important, pour un travail de haute qualité, qu'une granulométrie exacte avec un retard de compactage. Une levée d'environ

From a scheduling standpoint, raising the roads to keep up with the rise in the dam may require so much time that the system becomes inefficient as the daily increase in height accelerates. To avoid slowing down the placing operations, raising the roads during a 2-hour-a-day shutdown period while maintenance and other work is done should be considered.

Haul roads should transition onto the dam at as large an angle in plan view as possible so that tire damage to the top of the lift is minimized. If a right-angle turn is needed from roads entering the dam perpendicular to the face, significant scuffing and damage will result. Hauling units should turn slowly, using the largest turning radius possible. To the extent possible, the road should be constructed with clean, free-draining rock or gravel. The last portions of the roads entering the dam should be surfaced with a material that allows clean tires on the haul units, thereby preventing contamination of the RCC surface. A tire washing apparatus may be installed at this point. Extra RCC extending onto the road is not sufficient to keep the lift surface clean. The cleanliness of the lift surface is of such importance that RCC haul roads and yards in, for instance, lateritic soil areas need to be completely surfaced.

Regardless of the method of transportation, RCC should generally be deposited as close to its final location in the lift as possible. Scrapers and bottom dumps have the advantage of depositing material in the lift to be spread as they are moving. When end dumps are used, the material should be dumped on top of the new lift being placed, not on the one to be covered. This allows reworking of slightly segregated dumped material as it is bulldozed forward. Because of the typically dry consistency of RCC, segregation can become serious if the material is dumped in large piles. A general rule is to limit the height to 610 mm (2 ft); otherwise, the larger aggregate will roll to the bottom edges of the pile. Careful spreading by bulldozer can remix much of the segregation that might occur even with small piles, but this is nearly impossible if the rock has been rolled into location in the advancing layer. When placing on top of the new layer, blending can be accomplished as the material is pushed forward.

As seen in Photograph 1, bulldozers are normally equipped with lugless tracks (street pads) which leave a flat lift surface either horizontal or on the design slope, although tracks with lugs may produce better compaction. Slopes may be used for various reasons, such as for surface drainage where cross slopes on the order of 20 H (horizontal) to 1 V (vertical) to as flat as 50 H to 1 V have been used in some cases. About 15 H to 1 V is considered the maximum practical grade for RCC placement where vibratory rollers are used for compaction transverse to the slope. The roller should compact the lift only after it has been properly spread. Ridges or steps between adjacent passes of the bulldozer blade can result in uneven compaction. As a general rule, having a flat surface ready to roll in the least amount of time is more important in high-quality work than having an exact grade after delaying rolling. An approximately 330 mm (13 in) lift as spread with a bulldozer will usually result in a net 305 mm (12 in) compacted lift. Using a spreader box may require a 380 mm

330 mm étalée au bulldozer donnera généralement une levée finie compactée de 305 mm. Avec une cuve épandeuse, il faudra une levée de 380 mm pour obtenir une levée finie de 305 mm. Le contrôle de l'épaisseur des levées fait l'objet du paragraphe 3.3.6.11.

Aux États-Unis, l'épaisseur la plus commune des couches compactées a été de l'ordre de 300 mm, mais la tendance est de permettre l'adoption de levées plus épaisses sur les chantiers à venir, à condition que cela permette un compactage complet. Une couche d'une épaisseur de 300 mm peut facilement être déposée puis compactée au moyen de la plupart des engins et pour la grande majorité des mélanges. Une étude de chaque opération doit être faite pour définir l'épaisseur optimale de la couche et les ajustements de mélange dans le cas de couches épaisses. Des couches plus épaisses entraînent moins de joints de reprise et moins de chemins d'infiltration potentielle, mais des couches minces permettent de recouvrir les joints plus rapidement avec une meilleure liaison; des essais préliminaires sont recommandés. Les barrages Monksville [20] et Elk Creek présentent des couches de 600 mm, mais des barrages antérieurs, aux États-Unis, ont été construits avec des couches de 300 mm. Les 596 000 m³ prévus pour le barrage Urugua-i en Argentine seront mis en place par levées de 400 mm. Le barrage Copperfield, en Australie, a été construit en couches de différentes épaisseurs, allant jusqu'à 400 mm.

L'épandage au moyen d'engins sur roues, tels les chargeuses par l'avant ou les niveleuses automotrices, peuvent présenter certains inconvénients. Ces engins sont en général plus lents que les bulldozers, demandent plus de place pour évoluer, déchirent le BCR lorsque les pneus patinent quand l'engin tente de repousser trop de matériau, et précompactent le béton sous leurs pneus. De telles zones précompactées sont comblées par des matériaux supplémentaires durant l'épandage. Il se peut que parfois le rouleau passe sur ces zones précompactées en ne compactant que partiellement le matériau situé entre elles. Il semble que ce problème soit moins grave lorsqu'on utilise des engins sur chenilles ou sur gros pneus. Néanmoins et en règle générale, si le matériau présente une maniabilité suffisante pour subir un mouvement latéral sous l'effet de vibrations, le « pontage » ne se produira pas avec un matériau qui n'aura pas subi de ségrégation.

La niveleuse automotrice reste l'engin idéal pour le réglage final, mais une surface suffisamment plane peut également être obtenue par un conducteur de bulldozer expérimenté. Une niveleuse peut éventuellement être nécessaire pour étaler le matériau de façon sûre jusque sur le rebord extérieur d'une paroi non coffrée. La lame peut être orientée de telle sorte qu'elle dépasse les roues qui progressent en toute sécurité sur le sommet du barrage. La niveleuse est également efficace lorsqu'il existe une bande étroite de BCR enrichi, comme par exemple à proximité des parements. Les camions ne peuvent pas déverser le mélange dans une zone aussi restreinte, mais la lame de la niveleuse peut repousser le matériau déchargé jusqu'à son emplacement prévu et définitif.

3.3.4.4. *Compactage*

La consolidation est le terme employé pour le béton traditionnel, tandis que le BCR est densifié par compactage. Le BCR est damé ou compacté pour former une masse dense au moyen d'énergie transmise par des engins extérieurs plutôt que par vibration interne (ou externe) et densification sous l'effet de son propre poids [55]. Le compactage doit être effectué le plus tôt possible après l'épandage du béton sans « slump ». Il est classique d'adopter un délai de dix minutes après l'épandage et

(15 in) lift to net 305 mm (12 in). Control of lift thickness is discussed in Section 3.3.6.11.

In the USA, the most common compacted layer thickness has been 300 mm (1 ft), but the trend is to permit the use of thicker lifts on future projects if proven to achieve full compaction. A compacted thickness of 300 mm (1 ft) can easily be deposited and compacted using most equipment and mixture designs. Each job should be studied to determine optimum layer thickness to include mixture design adjustments for the thick layers. Thicker layers mean fewer lift joints and fewer potential seepage paths, but thinner layers allow the joints to be covered sooner with better bonding potential; preliminary tests are recommended. The Monksville [20] and Elk Creek Dams utilized 600 mm (2 ft) lifts, but earlier dams in the USA used 300 mm (1 ft) lifts. The 596 000 m³ (780 000 yd³) planned for Urugua-i Dam in Argentina will have 400 mm (16 in) lifts. The Australian Copperfield Dam used various lift thicknesses up to 400 mm (16 in).

Spreading with wheeled equipment such as a front-end loader or motor grader has several disadvantages. They are generally slower than the dozer, require more room, tear the RCC by spinning tires when attempting to push too much material, and precompact the material under the tires. Such precompacted areas are subsequently filled with additional material during the spreading operation. There is concern that the roller may ride on these precompacted zones and partially bridge over the material between them. It seems that this problem is less acute when tracked or heavy rubber-tired vehicles are used. In general, however, if the material has sufficient "workability" for lateral movement under vibration, bridging will not occur in unsegregated material.

A motor grader is ideal for final trimming, but a sufficiently smooth surface can be achieved by a skilled dozer operator. A grader may be needed to spread the material safely to the outside edge of an unformed face. The blade can be set so that it extends past the wheels which safely travel on the top of the dam. The grader is also effective where a narrow zone of enriched RCC is specified, such as near the faces. Hauling equipment cannot dump the mixture in such a limited area, but the grader blade can push the dumped material to its designated final location.

3.3.4.4. *Compaction*

Consolidation is the term applying to conventional concrete, but RCC is densified by compaction. RCC is tamped or rolled into a dense mass by external equipment energy rather than by being internally (or externally) vibrated and densified by settlement under its own weight [55]. Compaction should be performed as soon as possible after the no-slump concrete is spread. This typically is specified to be within 10 min of spreading and 30 min of the time of mixing, consistent with

rente minutes après le malaxage, conformément à la méthode empirique exposée dans le paragraphe 3.3.4.3. Un compactage complet peut cependant être obtenu à n'importe quel moment avant la prise initiale. Sur le barrage Ocoee n° 2 de la Tennessee Valley Authority, aux États-Unis, l'intervalle de temps entre le malaxage et le compactage a généralement été supérieur à une heure.

La technologie actuelle du BCR est fondée sur le compactage par rouleaux vibrants. Dans les spécifications suivantes, les rouleaux vibrants se sont avérés, dans la plupart des cas, être efficaces pour compacter les BCR utilisés dans la construction des barrages. Ces spécifications sont prévues pour des engins vibrants automoteurs de 10 tonnes, avec double rouleau. Des engins analogues ont été utilisés en Australie, au Canada, en Amérique du Sud et au Pakistan. En général, les Japonais ont utilisé des engins de 7 tonnes, mais ils envisagent d'adopter un matériel plus lourd dans les futurs ouvrages en BCR. La tendance dans l'industrie est de se servir de rouleaux vibrants plus lourds, et la technologie du BCR devrait bénéficier de la fabrication actuelle d'engins de 13 et 15 tonnes.

Les spécifications habituelles pour les engins de 10 tonnes sont les suivantes :

Largeur du rouleau	1,68 à 2,44 m
Diamètre du rouleau	1,22 à 1,68 m
Poids statique	9 500 kg minimum
Force dynamique	5,7 à 9,8 kg/mm de largeur de rouleau
Vitesse	2,4 km/h maximum
Puissance de l'excentrique	93 kW minimum
Fréquence	1 800 cycles/min au minimum

On appelle « passe » d'un rouleau vibrant un seul passage, mais non un circuit, ni une boucle, ni un aller-retour. Lorsque l'engin se déplace sans vibration, ce n'est pas une passe. Une passe avec un engin à double rouleau équivaut à 2 passes d'un engin à rouleau unique.

Les rouleaux vibrants doubles de 10 à 15 tonnes utilisés aux États-Unis peuvent compacter des couches de 150 à 460 mm. Néanmoins, les spécifications pour le barrage Upper Stillwater requièrent de 2 à 8 passes selon les résultats observés. Comme certaines autres, ces spécifications prévoient une première passe sans vibration pour aider à niveler la surface de la couche.

Au fur et à mesure que progressait la technologie du BCR, d'autres rouleaux et d'autres méthodes de compactage ont été utilisés et testés avec un succès variable. En ce qui concerne les rouleaux vibrants, la force dynamique semble être le facteur le plus critique. L'expérience acquise aux États-Unis a montré que, quel que soit le nombre de passes, les rouleaux plus petits ne produisaient pas le même niveau de compactage que les engins plus lourds. Bien que le compactage au moyen de rouleaux sur pneus ait produit des BCR de forte densité analogues à ceux obtenus avec des rouleaux vibrants, il faut beaucoup de soin pour réaliser l'uniformité du compactage dans toute l'épaisseur de la couche. Contrairement aux rouleaux automoteurs, les rouleaux tractés endommagent la surface de la levée lorsqu'ils sont poussés en marche arrière. Au barrage Tamagawa (Japon), une combinaison du roulant vibrant et du rouleau sur pneus a été utilisée.

Dans les zones resserrées et proches de coffrages ou d'affleurements rocheux, un compacteur du type Wacker à pied damant, ou un engin analogue, semble être le mieux adapté. Il est mobile, peut fournir une forte énergie et permet d'obtenir une

the “ rule of thumb ” stated in Section 3.3.4.3. Full compaction can be achieved, however, any time before initial set. At Tennessee Valley Authority’s (TVA) Ocoee Dam No. 2, USA, the time lapse between mixing and compaction generally exceeded 1 hour.

The present technology of RCC depends upon compaction by vibratory roller. Vibratory rollers within the following specifications have proven, in most cases, to be effective in compacting RCC mixtures typically used in dam construction. These specifications are for self-propelled, double-drum, 10-ton vibratory machines. Similar machines have been used in Australia, Canada, South America, and Pakistan. The Japanese have generally used 7-ton machines but are planning to use larger machines in future RCC construction. The trend in the industry is toward heavier vibratory rollers, and RCC technology is expected to benefit from the 13- and 15-ton machines now being manufactured.

The specifications for the 10-ton machines commonly used are as follows :

Drum width	1.68 to 2.44 m (66 to 96 in)
Drum diameter	1.22 to 1.68 m (48 to 66 in)
Static weight	9 500 kg (21 000 lb) minimum
Dynamic force	5.7 to 9.8 kg/mm of drum width (320 to 550 lb/in of drum width)
Speed	2.4 km/h (1.5 mile/h) maximum
Power of eccentric mass	93 kW (125 hp) minimum
Frequency	1 800 cycles/min minimum

A single vibrating pass is a length, not a circuit, lap, or round trip. Rolling without vibration should not be considered as a pass. One pass with a double-drum roller is equal to two passes with a single-drum roller.

The 10- to 15-ton, double-drum, vibratory rollers used in the USA can develop suitable compaction of 150 to 460 mm (6 to 18 in) layers. The Upper Stillwater Dam specifications, however, call for from 2 to 8 passes, to be determined by results. The Upper Stillwater Dam specifications, as do some others, call for an initial pass to be made without vibration to help in levelling the lift surface.

In the development of RCC technology, other rolling equipment and methods of compaction have been used and tested with varying degrees of success. For vibratory rollers, dynamic force is apparently the most critical factor. Experience in the USA has been that smaller rollers do not achieve the same level of compaction attainable with larger rollers, regardless of the number of passes. While compaction with rubber-tired rollers has produced high-density RCC similar to that produced with vibratory rollers, care must be exercised in ensuring the uniformity of compaction throughout the layer thickness. Unlike self-propelled rollers, towed rollers damage the lift surface when pushed in reverse mode. At Tamagawa Dam (Japan), a combination of vibratory and rubber-tired rollers has been used.

In tight areas and adjacent to forms and rock outcrops, a Wacker-type tamping foot compactor or equivalent is generally best suited. It is mobile and can provide high impact energy with good density. However, it usually does not leave a smooth

coffrés. La méthode suivante a été utilisée avec succès : chaque couche est exécutée légèrement au-delà de la ligne théorique, et puis une ligne est tracée à la peinture à la surface de la levée pour matérialiser le bord de la couche suivante, afin de guider la mise en place. Il est extrêmement difficile de combler une zone étroite si la largeur d'une couche n'est pas épandue et compactée jusqu'à la ligne théorique.

3.3.6.12. *Planches d'essais*

Comme dans le cas des remblais d'essais qui sont une aide précieuse pour l'assurance de la qualité de construction d'un barrage en remblai, des planches d'essais ou de « démonstration » sont importantes dans la construction en BCR. On a réalisé beaucoup de planches d'essais à grande échelle dans des buts de recherche et pour guider les projeteurs dans l'utilisation de cette nouvelle technologie; mais, en outre, on doit demander à l'Entrepreneur, responsable d'un nouveau barrage, de construire une planche d'essais en vue de certains objectifs importants. Un tel programme doit être combiné avec le programme de formation des inspecteurs, des contrôleurs et des ouvriers (paragraphe 3.3.6.2.). Cette planche d'essais doit reproduire les conditions réelles de mise en place et contribuer à l'expérience de tous les intervenants. Elle sera implantée à proximité du barrage, et on adoptera le même matériel que celui qui sera utilisé pour le début de la construction du barrage. La surveillance sera exercée par le même personnel. Une planche d'essais peut comporter dix à douze levées, sur une surface de 6 m × 12 m, avec les rampes d'accès nécessaires.

Les problèmes à étudier sont notamment : l'optimisation de la composition et de la teneur en eau du BCR, la ségrégation, le compactage, le coffrage et le traitement des parements, la vérification des cotes et des alignements, l'étalonnage des appareils de mesures nucléaires, et le rodage du laboratoire d'essais, autant d'aspects qui sont bénéfiques à la qualité de l'ouvrage achevé.

3.4. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT

3.4.1. Généralités

L'évaluation du comportement réel et prévu du BCR incorporé dans un barrage soulève des problèmes similaires et également différents de ceux posés par l'évaluation du béton mis en place suivant les méthodes traditionnelles. En principe, les études, le choix des matériaux, les dosages et les méthodes de construction sont conformes aux documents contractuels, établis selon les recommandations présentées dans les chapitres précédents. L'évaluation du comportement implique de vérifier que les opérations de contrôle de la qualité et les programmes d'assurance de la qualité se sont déroulés de telle façon que le béton dans l'ouvrage achevé présente les caractéristiques voulues. Par exemple, si l'on doit utiliser un ciment résistant aux sulfates, on suppose que ce ciment est imposé par le cahier des charges, acheté, livré et utilisé dans le barrage, et qu'il est conforme au produit défini par les spécifications.

En dernier lieu, les évaluations du comportement sont effectuées pour déterminer dans quelle mesure les caractéristiques prévues et réalisées sont satisfaisantes.

surface and can sink when tamping RCC placed over an excessive thickness of wet bedding mix. For larger areas, walk-behind compactors have been used effectively. Thinner lifts also may be necessary in areas where these smaller, more portable units are used.

As a general rule, the compacted thickness of any RCC layer should be at least three times the depth of the maximum size aggregate. The fresh surface should be smoothly spread so that the roller drum produces a uniform compactive force under the entire width of the drum. Rollers should not be used to “flatten” ridges or high spots that remain from spreading. The drum will otherwise overcompact the ridge and undercompact between ridges.

Overcompaction can lead to lower densities and should be avoided. This may occur locally and be difficult to detect; the top of a lift may become less dense while the bottom becomes more dense. Driving over a previously compacted lift with the drum vibrating should be avoided because it may disrupt the microstructure which is beginning to obtain initial set as the cement hydrates, but still has little strength.

Minor damage from scuff marks, unavoidable dozer tread tears, or other defects in the surface of a freshly compacted lift should be immediately rolled down with the drum in a static mode. If the concrete is sufficiently fresh, moist, and rerolled, the damage will be suitably rehabilitated. If the concrete is too old or severely damaged, the rerolled material may only appear to be acceptable. In this case, it can easily be blown off by compressed air used for cleanup of loose debris on the lift.

Each RCC mixture will have its own characteristic behavior and ideal moisture content for compaction with moisture in the 4-1/2 to 7 % range. Optimum moisture content will depend primarily on the compactive effort. Other considerations can be temperature, humidity, plasticity of the aggregate fines, overall grading, and the maximum size aggregate. Cement content has little effect on the moisture needed for compaction. Generally, RCC mixtures should compact to a close-textured, relatively smooth surface, as shown in Photograph 2. The material should not “pick up” onto the roller drum, nor should there be free surface moisture or pumping of excess water from the mixture. These conditions can be observed by trained inspectors, and adjustments can then be made in the moisture content.

Exposed edges of RCC layers which will not be extended with additional material should be rolled down at the steepest possible angle within about 30 min after placing. The roller should drive squarely into and over the edge without turning. Later, adjacent material can be placed and compacted against the already compacted edge while exercising care consistent with bonding requirements.

3.3.4.5. Bedding layers and cold joints

The Willow Creek Dam, USA, provided for a bedding mixture at the foundation bedrock contact and where a “cold joint” developed, as described below. This

(joint de reprise présentant une mauvaise liaison) sur le barrage Willow Creek, aux États-Unis. 22 couches de liaison sur un total de 263 couches ont été mises en place à Willow Creek. Le mélange utilisé sur ce barrage et sur la plupart des autres ouvrages en BCR était un béton traditionnel très sableux, à « slump » élevé et à prise retardée. Ce mélange contient normalement des gros granulats de 19 mm.

Les derniers projets d'ouvrages du type Willow Creek exigent qu'une largeur de matériau de liaison, en béton traditionnel, soit mise en place entre chaque couche près du parement amont, sauf dans le cas du barrage Elk Creek où chaque couche est entièrement recouverte. La couche de liaison débute généralement à une distance de 0,3 à 0,9 m du parement et présente une largeur d'au moins 1,8 m ou 0,08 fois la hauteur de retenue à cette cote. Sur le barrage Galesville, la couche de liaison présente une largeur de 1,2 m et est adjacente au béton traditionnel de parement, de 0,3 à 0,9 m de largeur, ce qui porte à 2 m la largeur de béton plastique enrichi qui maîtrise les fuites entre couches. Il est important de prendre de telles dispositions pour maîtriser les fuites le long des appuis et sur le parement amont du barrage.

Par contre, sur le barrage Upper Stillwater, rien n'a été prévu en ce qui concerne les couches de liaison. Un béton traditionnel est mis en place directement sur la fondation rocheuse de grès nettoyée pour former des plots nivelés, avant l'exécution du BCR. Le BCR, qui a une plasticité élevée, est mis en place directement sur les premières surfaces fraîches, puis sur chacune des surfaces de BCR qui suivent. Si un joint sec se forme, la surface est nettoyée au moyen d'un jet d'air et d'eau ou par sablage humide, puis une nouvelle couche de 300 mm est déposée. Les spécifications considèrent qu'un joint de reprise se forme sur toute levée de plus de 72 heures d'existence ou toute levée endommagée pour une raison quelconque. Les levées peuvent aussi être nettoyées en aspirant la surface pour éliminer toutes les particules mobiles.

Sur les barrages du type Willow Creek, les joints secs sont caractérisés par un indice de maturité. Par exemple, l'indice de maturité était de 1 600 °F-heures sur le barrage Willow Creek et 800 °F-heures sur le barrage Middle Fork avec des exigences variables quant au degré de nettoyage et d'utilisation de couches de liaison. L'indice de maturité pour le barrage Uruguay est de 700 °C-heures. La valeur de l'indice de maturité à spécifier est déterminée par jugement, en tenant compte des conditions thermiques.

Les degrés-heures sont déterminés en cumulant les températures moyennes en degrés à la surface de la levée durant chaque intervalle d'une heure après compactage de la surface. La transformation des degrés-heures Celsius en degrés-heures Fahrenheit est possible quand on connaît le nombre total d'heures. L'indice de maturité permet de détecter une surface dont la maturité aura atteint un niveau tel qu'un traitement spécifique est exigé afin d'assurer la stabilité au glissement ou l'étanchéité exigée par le projet.

Les couches de liaison et le traitement des joints sont moins importants lorsque l'ouvrage a été conçu avec un parement amont étanche.

3.3.4.6. *Cure et protection climatique*

Après la mise en place et le compactage du BCR, la surface de la levée subira une cure et sera protégée comme un béton mis en place selon les méthodes traditionnelles. La surface doit être maintenue humide, par projection d'un brouil-

resulted in the use of 22 bedding lifts out of a total of 263 lifts placed in Willow Creek Dam. The mixture used there and at most other RCC projects consisted of a highly sanded, high slump retarded conventional concrete. This mixture normally contains a 19 mm (3/4 in) coarse aggregate.

The latest designs in the Willow Creek type structures require a width of bedding material of conventional concrete mixture adjacent to the upstream face between all lifts, except in the case of Elk Creek Dam where the entire lift is covered. The bedding usually starts 0.3 to 0.9 m (1 to 3 ft) from the face and is a minimum of 1.8 m (6 ft) wide or 0.08 times the reservoir head at that elevation. At Galesville Dam the bedding is 1.2 m (4 ft) wide adjacent to the conventional facing concrete which, although a minimum of 0.3 m (1 ft) wide, slopes to 0.9 m (3 ft) wide at the lift surface, making a 2 m (7 ft) wide zone of enriched plastic concrete to control leakage between lifts. It is important to carry such leakage control along the abutments as well as along the upstream face of the dam.

The Upper Stillwater Dam, on the other hand, makes no provision for bedding layers. Conventional concrete is placed directly on the cleaned sandstone bedrock foundation in a series of levelling blocks before the RCC placement is started. The RCC mixture, having considerable plasticity, is placed directly on the fresh starting surfaces and then upon each succeeding lift of RCC. If a cold joint is formed, the surface is cleaned with an air and water jet or wet sandblast, and then a fresh 305 mm (12 in) lift is placed. A cold joint is described by specifications as any lift over 72 hours old or a lift which has been damaged for any reason. Lifts may also be cleaned by vacuuming the surface to remove loose particles.

The Willow Creek type dams define cold joints by means of a maturity index. For example, the maturity index was 1 600 °F degree-hours at Willow Creek Dam and 800 °F degree-hours at Middle Fork Dam with variable requirements on the extent of cleanup and use of bedding layers. The maturity index for Uruguay-i Dam is 700 °C degree-hours. The specified maturity index is decided upon by judgment, considering thermal conditions.

Degree-hours are determined by accumulating average temperature in degrees at the lift surface during each 1-hour increment of time after the surface has been compacted. Degree-hours Celsius and Fahrenheit can be equated once the total hours are known. The purpose of the maturity index is to recognize a surface which has matured to the extent that special treatment is required in order to provide for the sliding stability or watertightness required by design.

Bedding layers and joint treatment are less a consideration when the structure has been designed with a positive upstream watertight barrier.

3.3.4.6. Curing and protection from weather

After RCC has been placed and compacted, the lift surface must be cured and protected as would concrete placed by conventional methods. The surface must be maintained in a moist condition. This is done by fog spraying or by covering. The

lard ou couverture. La surface sera également protégée contre le gel au moyen de bâches en plastique jusqu'à ce qu'elle atteigne une maturité suffisante.

La cure de la dernière couche de BCR sera maintenue sur une période qui dépasse en général 14 jours. Le compound de cure est généralement considéré comme inadapté du fait de la difficulté de réaliser une couverture à 100 % de la surface relativement rugueuse, du fait des dommages probables causés par les travaux et de la faible teneur en eau initiale au sein même du mélange et, enfin, du fait de l'impossibilité de la maîtrise de la température de surface associée à la cure humide lorsqu'il y a une humidité ambiante relativement faible. Une cure efficace peut être obtenue en recouvrant le béton d'une couche de sable ou de terre humide qui fournira aussi une protection thermique.

Les surfaces inclinées non coffrées, comme le parement aval d'un barrage, peuvent être considérées comme « sacrifiées » et ne nécessitant aucune cure. Le BCR exposé dans une telle zone ne sera pas compacté et sera surtout formé de granulats enchevêtrés et lâches. Sur une épaisseur pouvant atteindre 305 mm, le béton ne pourra mobiliser aucune véritable résistance ou qualité, mais servira de protection et de barrière contre l'humidité pour le béton interne. Au barrage Willow Creek, les essais ont montré que seuls les 76 mm extérieurs étaient « sacrifiés ».

Durant les travaux, les surfaces compactées des couches de BCR doivent demeurer humides sans accumulation d'eau. La meilleure solution pour obtenir ce résultat est de disposer de camions-citernes sur le lieu de bétonnage 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Lorsque la main-d'œuvre n'est pas coûteuse, et/ou lorsque la zone est trop encombrée pour permettre l'utilisation des camions *in situ*, l'emploi de systèmes d'aspersion ou de tuyaux tenus à la main peut être plus efficace. Les camions distribueront un film humide qui ne délavera pas, n'érodera pas la surface, ni ne produira pas de flaques d'eau. Ils seront complétés par des tuyaux d'arrosage tenus à la main qui peuvent atteindre les endroits inaccessibles aux camions. Il faut prévoir de conserver la surface humide pendant que les véhicules refont le plein de carburant, ou d'eau, ou lorsqu'ils sont en cours d'entretien. Il faut également veiller à ce que les camions fassent le moins de demi-tours possible et qu'ils évitent d'endommager la surface de béton.

En cours de bétonnage, une légère pluie peut être tolérée à condition que les engins ne transportent pas de boue sur le BCR ou qu'ils n'introduisent aucune humidité sur la surface, causant ainsi des dégâts au matériau compacté. Les dégâts deviennent évidents lorsque le rouleau commence à ramasser du matériau sur son tambour; c'est à ce moment là que le bétonnage doit être interrompu. Lorsque des tapis transporteurs sont utilisés et qu'il y a peu ou pas de circulation d'engins sur le BCR, les travaux peuvent continuer par temps humide mais il faudra envisager une diminution progressive de la quantité d'eau du mélange à cause du degré plus élevé d'humidité. Le moment où les dégâts apparaissent lorsque le béton est mis en place sous trop forte humidité est facile à détecter et cela arrive généralement subitement. Ces conditions sont décrites dans le paragraphe 3.3.4.4.

Dès qu'une couche de BCR a été compactée, elle devient imperméable et, à condition qu'il n'y ait aucune activité ou circulation d'engins sur sa surface, elle ne pourra être endommagée si ce n'est par une forte pluie. Dès que la surface a commencé à sécher naturellement pour donner son état SSD (saturated-surface dry), les travaux peuvent reprendre. Une surface de 2 à 5 % de pente pourra faciliter le drainage de l'eau libre.

surface should also be protected from freezing by insulating with plastic blankets until it gains sufficient maturity.

The final layer of RCC should be cured for an appropriate time, generally in excess of 14 days. Curing compound is generally considered unsuitable because of the difficulty in achieving 100 % coverage on the relatively rough surface, the probable damage from construction activity, the low initial moisture in the mixture, and the loss of beneficial surface temperature control that is associated with moist curing when there is low relative humidity. An effective cure is covering with a layer of damp sand or earth which will also provide beneficial thermal protection.

Unformed sloping surfaces such as the downstream face of a dam can be considered "sacrificial" and unnecessary to cure. The exposed RCC in this area will be uncompacted and consist mostly of raveling, loose aggregate. The outside several millimeters (inches) to 305 mm (12 in) of concrete will be incapable of achieving any significant strength or quality but will serve as protection and a moisture barrier for the interior concrete. Tests at Willow Creek Dam show that only the outside 76 mm (3 in) were actually "sacrificed".

During construction, the compacted surfaces of RCC layers should be maintained in a damp condition but without ponded water. This is most conveniently accomplished with water trucks that stay on the placement 24 hours a day, 7 days a week. Where labor is inexpensive and/or the area is too congested for effective use of trucks, sprinkler systems and hand-held hoses may be more efficient. The trucks must apply a fine mist that does not wash or erode or puddle on the surface. They should be augmented with hand-held hoses for reaching areas inaccessible to the truck. Provision must be made for keeping the surface damp while the trucks are fueled, maintained, and refilled with water. Care should be exercised to keep the amount of turning of the trucks and disruption to the surface at a minimum.

During placing, a light rain can be tolerated providing that equipment does not track mud onto the RCC or begin to drive moisture into the surface, damaging the compacted material. Damage is evident when the roller begins to pick up material on the drum; it is then that placing should be discontinued. When conveyors are used for delivery and little or no vehicular traffic is necessary on the RCC, construction can continue in damp weather but may require a gradual decrease in the amount of mixing water used because of the higher humidity. The point at which damage first occurs from operating under conditions that are too wet is obvious and usually sudden. These conditions are described in Section 3.3.4.4.

Immediately after an RCC layer has been compacted, it is essentially impermeable and will not be damaged except by heavy rains, providing that there is no activity or traffic on it. After the surface has begun to dry naturally to a saturated-surface dry (SSD) condition, construction can resume. A sloped surface on the order of 2 to 5 % will aid in draining free water.

Comme pour un béton traditionnel, il faut prévoir une protection contre les températures extrêmes, si le cas se présente. L'absence caractéristique de joints de contraction (retrait) et de joints entre plots augmente le problème de fissuration par retrait et par baisse de température. Chaque chantier doit évaluer les conditions climatiques locales ainsi que les propriétés thermiques, mécaniques et de fluage du BCR mis en œuvre.

La chaleur émise continuellement par la masse du BCR et la mise en place continue peuvent se combiner pour autoriser le bétonnage par temps froid, même pour des températures ambiantes de gel, à condition naturellement que la surface se maintienne au moins à 1 °C (2 °F) au-dessus du point de congélation jusqu'à ce qu'elle soit recouverte par la couche suivante.

Sous les climats froids, une attention particulière sera portée aux problèmes susceptibles d'être causés par le refroidissement rapide de la grande surface de BCR exposée au froid, surtout pendant la nuit, dans l'attente de la couche suivante. Le cycle de bétonnage peut être adapté pour pallier ces conditions anormales de refroidissement, en exécutant la mise en place pendant la nuit. Dans d'autres cas, il est possible d'utiliser une isolation sous forme d'une couverture en plastique pour empêcher la perte rapide de chaleur et une éventuelle fissuration thermique de la masse.

Il peut y avoir des avantages à mettre en place des couches plus épaisses sous les climats chauds, afin de réduire le nombre total des joints secs potentiels. Sous les climats plus frais ou caractérisés par de grands écarts de températures, une pose rapide de couches plus minces peut servir à protéger les couches inférieures déjà durcies pendant que les couches supérieures plastiques absorbent le choc thermique.

Les calculs thermiques et le programme de mise en place des couches répondant aux conditions thermiques à respecter sont présentés dans le paragraphe 3.1.

3.3.5. Méthodes spéciales de construction

3.3.5.1. Dispositifs pour parements

Un des avantages économiques des barrages BCR et RCD est que les coffrages transversaux le long des faces internes des plots sont éliminés. Néanmoins, d'autres mesures pour éviter les fissures d'origine thermique sont nécessaires. Sur les barrages RCD au Japon, un dispositif à lame a été utilisé pour découper des joints dans la couche avant son compactage. Ces joints sont perpendiculaires aux parements du barrage et servent à prévenir la fissuration inhérente à la construction des barrages en béton traditionnel. Côté parement amont, le joint vertical est muni d'un waterstop en PVC (chlorure de polyvinyle) et/ou en acier inoxydable, noyé dans le béton du parement pour empêcher les infiltrations. Le barrage Elk Creek, aux États-Unis, présente des joints analogues à ceux décrits ci-dessus, les intervalles spécifiés variant de 45 m à 129 m.

Le parement amont du barrage Willow Creek a été construit avec des panneaux en béton préfabriqués, maintenus en place par des barres de 1,5 m de longueur noyées dans le béton. Dans ce procédé de construction, des panneaux conjugués, de 1,2 m × 4,9 m, et de 89 mm d'épaisseur, étaient mis en place sur champ, puis du BCR était placé contre les panneaux. Pendant la mise en place du BCR, des « épines dorsales » en acier attachées à la partie extérieure des panneaux et des barres d'ancrage en acier assuraient la stabilité nécessaire. Le BCR utilisé contenait

Protection from temperature extremes should be provided where appropriate, the same as for conventionally placed concrete. The typical lack of contraction and monolith joints adds to the concern for cracking from shrinkage and temperature declines. Each job must be evaluated for local climatic conditions and the thermal, mechanical, and creep properties of the RCC used.

The continuous heat evolving from the RCC mass and the continuous placing sequence can combine to allow placing in cool weather, even when ambient conditions occasionally drop below freezing, providing that the surface stays at least 1 °C (2 °F) above freezing until covered by the subsequent lift of material.

In cold climates, attention must be given to the potential problems caused by rapid cooling of the large exposed RCC surface, particularly during the nighttime temperature, while awaiting the next lift. The placing cycle can be adjusted to overcome such irregular cooling conditions by nighttime placing. In other instances, insulation in the form of plastic blankets can be used to prevent rapid heat loss and possible thermal cracking of the mass.

Advantages may be realized by placing thicker lifts in warm climates to reduce the total number of potential cold joints. In cooler climates or climates subject to wide temperature extremes, rapid placement of thinner lifts may serve to protect hardened lower lifts while plastic upper lifts “ absorb ” the thermal shock.

Thermal design and resulting careful lift scheduling to comply with the thermal requirements are covered in Section 3.1.

3.3.5. Special construction methods

3.3.5.1. Facing systems

One economic advantage of RCC and RCD is that formed transverse walls along the inside faces of monolithic blocks are eliminated. However, other measures to prevent temperature cracks are required. At RCD dams in Japan, a modified backhoe ram was used to cut the joints through the lift prior to compaction. These joints are perpendicular to the dam faces and are used to prevent cracking consistent with conventional concrete dam construction. The vertical joint at the upstream face contains a polyvinyl chloride (PVC) and/or stainless steel waterstop embedded in the facing concrete to control seepage. Elk Creek Dam, USA, has joints similar to those described above specified from 45 m (140 ft) to 129 m (400 ft) intervals.

The upstream face at Willow Creek Dam was constructed using precast concrete panels held in place by 1.5 m (5 ft) long rods embedded in the concrete. In this procedure, 1.2- by 4.9-m (4- by 16-ft) interconnecting panels 89 mm (3-1/2 in) thick were stacked edgewise and RCC was placed against them. Steel “ strong backs ” attached to the outside of the panels and steel anchor rods provided support during the RCC placing. The RCC mixture used contained 104 kg/m³ (175 lb/yd³) of cement as compared with the 72.4 kg/m³ (122 lb/yd³) of cement and fly ash

104 kg/m³ de ciment (à comparer aux 72,4 kg/m³ de ciment et de cendres volantes du béton maigre interne et aux 134 kg/m³ utilisés pour le parement aval du barrage).

Les panneaux étaient une variante conçue par l'Entrepreneur. Le BCR de parement à 104 kg/m³ a été placé en bandes de 2,7 m de largeur et compacté juste à côté des panneaux au moyen d'un petit compacteur vibrant. Le parement du barrage comprenait en tout 2 600 panneaux dont le but était uniquement de constituer un support pour le BCR du parement. Les panneaux n'étaient pas noyés dans le béton, exception faite des deux barres d'ancrage, mais étaient drainés pour éviter la formation de sous-pression.

D'autres barrages du type Willow Creek ont été construits ultérieurement avec des parements amont traditionnels et des parements constitués de panneaux préfabriqués permanents (utilisés également pour les murs-bajoyers longitudinaux d'évacuateurs de crue). Les joints à recouvrement sont tenus pour être plus pratiques que les joints à « rainures et languettes ». Sur le barrage Winchester, les panneaux comportent un revêtement intérieur en PVC formant une membrane imperméable continue sur la face arrière. Ce procédé s'est avéré efficace à 100 % pour constituer une barrière imperméable. Des polyéthylènes à forte densité peuvent également être utilisés comme revêtement. Le matériau doit être épais (2 mm), durable et soudé à chaud « in situ » à chaque joint.

Sur le barrage Upper Stillwater, les couches de BCR de 305 mm sont compactées entre des bordures de béton traditionnel emboîtées horizontalement sur toute la longueur des 800 m du barrage et mises en place avec un coffrage glissant. Cette solution, qui remplace le parement amont vertical coffré et le parement aval coffré au fruit de 0,60 H sur 1,0 V, est en fait une mesure d'économie qui donne une meilleure finition aux deux parements, permettant ainsi au barrage de mieux « vieillir ». Les bordures sont fabriquées par une machine dérivée de celle construisant les glissières pour routes et guidée par laser. Cette méthode de construction de parements en béton de gros œuvre, au moyen d'une machine à paver avec coffrage glissant, a été utilisée pour la première fois en Grande-Bretagne, et Raphael l'a décrite dans son ouvrage intitulé « The Optimum Gravity Dam » [56].

Sur de nombreux barrages du type Willow Creek, les parements aval ne sont pas coffrés, sauf lorsque les parties supérieures sont presque verticales; ils sont construits en décalant les couches successives pour obtenir un fruit moyen de 0,8 H sur 1 V ou de 0,75 H sur 1,0 V, suivant les spécifications. La pente finie a un aspect en gradins horizontaux et s'épaufrera pour éliminer les matériaux lâches externes. Le parement est surdimensionné pour compenser la « perte » de matériau instable. Ce genre de construction, également décrit dans le paragraphe 3.3.4.3., ainsi que d'autres peuvent exiger des mesures de sécurité durant les travaux sous forme de palissades ou barrières temporaires, qui doivent être fermées immédiatement après la mise en place d'une levée.

Sur le barrage Middle Fork [6, 51] c'est un béton traditionnel qui a été utilisé pour constituer des bordures-coffrages de 305 mm placées sur la couche finie à 244 mm du bord du parement aval, lui donnant un aspect d'escalier agréable au point de vue esthétique. Les marches ne sont ni ancrées ni liées de façon monolithique à la masse du BCR. Des parois en escalier, construites de façon analogue, ont été utilisées sur les bassins d'amortissement de l'évacuateur de crue du barrage de Tarbela, mais une séquence de compactage différente et la pose d'armatures d'acier espacées de 1,5 m donnent à l'ouvrage plus de résistance et l'équivalent d'un parement en béton traditionnel.

combined for the lean interior mixture and the 134 kg/m³ (225 lb/yd³) used on the downstream face of the dam.

The panels were a contractor-devised option. The 104 kg/m³ (175 lb/yd³) facing RCC was placed in 2.7 m (9 ft) wide lanes and compacted immediately adjacent to the panels with a small vibratory compactor. The dam face ultimately contained 2 600 panels which were intended only to provide support for the facing RCC. The panels were not embedded, except for two anchor rods, but were allowed to “ drain ” to prevent a buildup of water pressure behind them.

Subsequent dams of the Willow Creek type used both conventional upstream faces and permanent precast panels which have also been used for spillway training walls. Shiplapped joints are considered more practical than tongue and grooved joints for panels. At the Winchester Dam, the panels have an interior facing of PVC (polyvinyl chloride) joined to make a continuous waterproof membrane behind the panels. This procedure has been 100 % effective in providing a watertight barrier. High-density polyethylenes also can be used for a liner. The material should be thick [2 mm (0.08 in)], durable, and heat welded in the field at all joints.

At Upper Stillwater Dam, the 305 mm (12-in) RCC lifts will be compacted between interlocking curbs horizontally slip formed for the 800 m (1/2 mile) dam length using conventional concrete. This solution, in lieu of forming the vertical upstream face and the 0.60 H on 1.0 V batter of the downstream face, is an economy measure which will provide for a better surface by stacking the interlocking curbs up both faces, helping the dam to “ wear ” better. The curbs will be made by a modified version of a highway barrier-forming machine with a laser guidance system. Early work on this method of producing the faces of structural-quality concrete laid by slip-form pavers was done in the United Kingdom, and Raphael described it in “ The Optimum Gravity Dam ” (1970) [56].

On many of the Willow Creek type dams, the downstream faces are not formed, except in instances where the upper portions are nearly vertical, but are placed by pulling back each succeeding lift to make an average 0.8 H on 1 V or 0.75 H on 1.0 V batter, as required. The finished slope has a horizontally corrugated appearance and is expected to ravel away the loose outside material. It is overbuilt to permit “ sacrifice ” of the loose material on the face. This type of construction, which is also described in Section 3.3.4.3., and other construction as well, may require personnel safety measures during construction in the form of temporary fences or barriers to be closed immediately behind the lift placement.

The Middle Fork Dam [6, 51] used conventional concrete and 305 mm (12 in) curb forms set on the finished lift 244 mm (9.6 in) from the edge for the downstream face, giving a stepped appearance which is aesthetically pleasing. The steps are not anchored or monolithically bonded to the RCC mass. Similarly formed stepped faces were used on the spillway plunge pools at Tarbela Dam, but a different rolling sequence and reinforcing steel anchors at 1.5 m (5 ft) centers ensure a more robust structure and conventional concrete facing.

3.3.5.2. *Dérivation provisoire, galeries, drainage interne*

Pour tous les barrages BCR, achevés ou en cours d'étude, la dérivation provisoire est réalisée au moyen de conduits noyés dans le béton à la base de l'ouvrage. Au barrage Upper Stillwater, il a fallu deux conduits de 3 mètres de diamètre, situés dans une tranchée excavée dans la fondation rocheuse et réalisés en béton ordinaire. Dans certains cas, on associe les conduits de dérivation aux vidanges de fond. Tous les dispositifs de dérivation normalement utilisés pour les barrages-poids conviennent sauf un : il n'est pas facile, dans le cas d'un barrage BCR, de permettre le déversement des crues importantes sur certains plots laissés exprès plus bas que d'autres [37], parce qu'il n'y a pas de tels plots dans un ouvrage en BCR.

Trois procédés différents existent pour la réalisation de galeries internes :

- coffrages ordinaires;
- mise en place, à l'emplacement de la galerie, de gravier ou de sable sans liant, ces granulats meubles étant excavés par la suite pour réaliser la galerie. La paroi interne qui en résulte permet l'inspection du BCR après l'enlèvement des matériaux meubles. Cependant, la paroi est rugueuse et certains granulats restent collés au BCR. Pour parer à cet inconvénient, on peut placer des séparateurs en bois entre le BCR et les granulats, lors de la réalisation de chaque levée;
- éléments en béton préfabriqués pour servir de coffrage perdu; ce procédé n'a pas été utilisé du fait qu'il est onéreux, que les éléments séparent la levée en zones inaccessibles et qu'ils ne permettent pas l'inspection du BCR.

Dans tous les cas, les galeries sont nuisibles à la mise en place systématique du BCR. Dans la mesure du possible, les ingénieurs de projet les suppriment dans les barrages BCR.

Plusieurs barrages récents comportent des trous de drainage à proximité du parement amont et débouchant dans la galerie. Le diamètre de ces drains varie de 73 mm à 102 mm. Généralement, ces drains sont forés verticalement depuis la surface d'une levée jusqu'à la galerie. Ensuite, la surface de la levée est alors traitée comme un joint sec et est réparée, et la mise en place du BCR est poursuivie. Dans le cas des barrages Upper Stillwater et Middle Fork, la galerie a permis également l'injection de la fondation rocheuse et l'accès aux galeries de rive.

3.3.5.3. *Évacuateurs de crue*

La plupart des barrages BCR construits ou en cours d'étude comportent un déversoir de surface et un bassin d'amortissement au pied aval. La durée de fonctionnement des évacuateurs de crue des barrages Willow Creek et Galesville sera probablement peu importante. Ces déversoirs sont construits sans coffrage, dans des conditions permettant d'accepter une certaine érosion du bord extérieur, non consolidé, des levées en BCR, en cas de déversement. Le profil, en crête, est constitué de béton projeté.

Aux barrages Upper Stillwater et Monksville (États-Unis), la doucine entre la crête et le pied est en escalier et réalisée au moyen, soit de béton coffré, soit d'empilement de blocs en béton arrangés pour donner la forme voulue en escalier. Les « marches », de 150 mm à 450 mm de largeur, aèrent l'écoulement, permettant de réduire les dimensions du bassin d'amortissement au pied de l'ouvrage, compte

3.3.5.2. *Diversion, galleries, and interior drainage*

Diversion on all of the RCC dams built or planned to date has been accomplished by using embedded conduits through the base of the dam. At Upper Stillwater Dam, this required two 3 m (10 ft) diameter conduits placed in a bedrock trench and concreted with conventional concrete. In some cases, diversion facilities are combined with low-level outlets, as would be expected. All of the usual diversion schemes for concrete gravity dams are available except one : RCC dams cannot readily be constructed to allow for larger floods to overtop individual monoliths purposely left low during construction for river control [37], since such low blocks do not exist in RCC construction.

There have been three different approaches to constructing galleries within the dam. One method is by conventional forming and another is by placing plain gravel or sand in that part of the RCC lift where the required gallery will be, later mining uncemented material to open the gallery. The interior surface resulting from the latter allows inspections of the RCC after all loose material is removed. However, roughness from the fill material remains, and some of it will adhere to the RCC. A method to overcome this is to use wood separators between the RCC and fill as each layer is placed. Precast concrete sections to be installed as permanent gallery linings are an option that has not been used because of cost, because they separate the lift into inaccessible areas, and because they do not permit inspection of the RCC. In any case, galleries are impediments to the systematic placement of RCC. Whenever possible, design engineers are eliminating them from RCC dams.

Several recent dams have interior drainage holes near the upstream face that terminate in the gallery. These holes vary in diameter from 73 mm (2-7/8 in) NX size to 102 mm (4 in) and are usually drilled vertically from the surface of a lift into the gallery. The surface of this lift is then treated as a cold joint and repaired, and RCC placement is continued. In the case of Upper Stillwater and Middle Fork Dams, the gallery also serves for grouting the bedrock foundation and for access to abutment adits.

3.3.5.3. *Spillways*

Most of the RCC dams constructed or under consideration to date have overtopping spillways and stilling basins at the downstream toe. Usage of Willow Creek and Galesville Dams spillways is expected to be minimal. Their spillways were constructed without forming and in a condition to accept some erosion of the unconsolidated outside edge of the RCC lifts if it should occur. The ogee crest used shotcrete.

The Upper Stillwater and Monksville Dams in the USA use a stairstep arrangement of either formed concrete or stacked concrete facing curbs modified to form steps from the top to the bottom of the spillway chute. The steps, ranging in width from 150 to 450 mm (6 to 18 in), aerate the water, allowing a smaller stilling basin at the base because of the energy dissipation on the steps. The 3 m (10 ft) high, 3.7 m

tenu de la dissipation d'énergie obtenue sur l'escalier. Au barrage Upper Stillwater, la crête du déversoir, de 3,7 m de largeur et de 3 m de hauteur, sera en béton armé, coulé sur place.

3.3.6. Assurance et contrôle de la qualité

3.3.6.1. Généralités

Compte tenu de la rapidité de construction des ouvrages en BCR, le temps nécessaire à la réalisation des essais de résistance à la compression sur des éprouvettes cylindriques de béton, comme méthode de contrôle, est un inconvénient majeur. De plus, il est difficile de réaliser des éprouvettes cylindriques qui soient vraiment représentatives du BCR compacté. Ces éprouvettes constituent surtout des données d'archives, utiles pour l'assurance de la qualité, mais ne sont pas adaptées au contrôle jour par jour de la qualité. On a proposé l'essai Vebe modifié comme moyen d'essai du BCR sur le chantier, mais on a constaté que cette méthode n'était en général pas acceptable pour des BCR à faible teneur en eau [74]. Cet essai est mieux adapté au BCR comportant des petits granulats et une teneur en liant plus élevée, comme celui utilisé au barrage Upper Stillwater. Les chercheurs américains ont conçu un essai Vebe modifié en remplaçant la plaque de surcharge standard de 3,4 kg par une plaque de 9 kg ou de 22,7 kg, pour améliorer les résultats et adapter cet essai au béton sans slump.

Il est essentiel de porter attention au contrôle approfondi des matériaux (granulométrie, dosage en ciment, dosage en eau) et aux conditions de mise en place. Si les granulats sont conformes au cahier des charges (origine, qualité), si les liants proviennent de source préqualifiée et sont essayés au préalable, si la technique et les durées de malaxage, d'épandage et de compactage sont conformes aux spécifications, et si la méthode préconisée de cure du béton frais est suivie, alors le produit final sera acceptable. Les résultats du compactage, ainsi que la teneur en eau, peuvent être mesurés à l'aide d'un nucléo-densimètre.

Un avantage du BCR, réalisé selon cette méthode, vient du fait que tout matériau inacceptable est décelé très vite et peut être enlevé sans surcoût important. Par exemple, une zone de matériau de faible densité peut être identifiée par les mesures au nucléo-densimètre très vite après sa mise en place, et on peut enlever cette zone avant qu'elle n'atteigne sa résistance finale. Les matériaux refusés peuvent être évacués du chantier avant d'être incorporés dans les ouvrages.

Pendant la réalisation d'un barrage BCR, le personnel responsable de l'étude du barrage et celui chargé de la surveillance des travaux seront conscients du fait que des matériaux indésirables seront parfois mis en place (comme dans toutes les autres méthodes de construction). Le personnel de chantier ne doit pas trop réagir si certaines gâchées ponctuelles de matériaux « refusables » sont mises en place, lorsque ces matériaux ne mettent pas en péril la fonction générale de l'ouvrage et lorsque leur remplacement créerait une situation plus préjudiciable qu'une réparation. On doit identifier les opérations critiques méritant une plus grande attention pendant la construction et l'inspection, afin d'éviter la mise en place de matériaux douteux.

(12 ft) wide spillway crest at Upper Stillwater Dam will be reinforced, cast-in-place concrete.

3.3.6. Quality assurance and control

3.3.6.1. General

Because of the rapid construction rates of RCC, a major disadvantage in the use of concrete test cylinder compressive strengths as a method of control is the time required to obtain results. Also, it is difficult to prepare compression cylinders which are representative of the compacted RCC. Test cylinders serve primarily as record data for quality assurance and are not an effective method of day-to-day quality control. The modified Vebe test has been proposed as an RCC field test but was not found to be generally acceptable with dry RCC mixtures [74]. The system is more suited to smaller aggregate RCC with higher paste content such as at Upper Stillwater Dam. Investigators in the USA have devised a modified Vebe test by using, in one case, 9 kg (20 lb) and in another 22.7 kg (50 lb) instead of the standard 3.4 kg (7.5 lb) weighted surcharge bearing plate to improve the results and make the test more appropriate for the no-slump mix.

Emphasis on thorough control of materials (gradation, cement content, and moisture content) and conditions during placement is essential to proper RCC. If the aggregates are as specified with regard to source and quality, the cementitious materials are pretested from prequalified sources, the technique and timing of mixing, spreading, and compacting are within the designated guidelines, and an appropriate method of curing is followed, the end product will be acceptable. Compaction results and moisture content can be measured with a nuclear density gage.

An advantage of RCC and the above approach is that unacceptable material is identified early and can be removed at relatively low cost. For example, a zone of low-density material can be identified by nuclear density gage testing within a short time of placing and then can be removed prior to achieving final strength. Rejected materials can be removed from the construction site before being used in the work.

During construction of an RCC dam, both the designer and inspection personnel should be aware that, as with other construction methods, undesirable material will be placed occasionally. Field personnel should not overreact to isolated cases of placement of "rejectable" material that does not jeopardize the overall function of the structure and where remedial action would create a worse condition than leaving the material in place. Critical operations should be identified and given more attention during construction and inspection to prevent placement of marginal material.

3.3.6.2. *Formation et orientation*

Dans le cadre du programme d'assurance et de contrôle de la qualité, on doit prévoir des séances d'orientation et de formation à l'intention des surveillants, des inspecteurs et des ouvriers. Il faut que tous les intervenants comprennent parfaitement les différences existant entre les techniques relatives au béton ordinaire, au BCR et aux remblais de gravier. Il faut expliquer les problèmes fondamentaux, tels que : limitation des durées de malaxage, épandage et compactage; problèmes concernant la ségrégation, la qualité des joints, la cure du béton. On doit souligner que, si le BCR a initialement le même aspect et le même comportement que le remblai de gravier, il s'agit néanmoins d'un béton et il doit être traité avec les mêmes précautions que le béton classique.

3.3.6.3. *Granulométrie des granulats*

La productivité élevée que permet le BCR exige qu'une grande réserve de granulats soit disponible sur le chantier, avant de commencer le bétonnage. De plus, il y a là un avantage du point de vue du contrôle de la granulométrie puisque, pendant la production des granulats, on peut utiliser les matériaux qui, dans d'autres conditions, seraient perdus. Les matériaux refusés lors de la mise en route des installations de concassage et de criblage peuvent être épandus sur les zones de stockage des granulats, pour former une sorte de plancher, pendant que les mises au point du matériel sont effectuées. En exploitation normale, si les granulats produits ne sont pas momentanément conformes aux spécifications, ils peuvent être épandus sur les grands tas de granulats déjà en place, pour assurer un mélange acceptable lors de la reprise des matériaux sur les tas. De cette façon, le réglage des installations peut être systématique et progressif, sans interrompre leur production outre mesure. Le stockage des granulats facilite également le maintien de conditions stables (teneur en eau, répartition de la température) dans les granulats, ce qui permet un contrôle du mélange.

3.3.6.4. *Malaxage*

L'expérience montre que l'on ne peut pas juger la qualité du malaxage d'après le seul aspect du BCR sortant de la bétonnière. En effet, dans un BCR apparemment homogène, il peut y avoir un défaut de répartition du ciment; de même, un BCR quasiment exempt de ciment peut apparaître, au toucher et à l'œil, comme un BCR à faible teneur en ciment. Le contrôle des performances des bétonnières est nécessaire pour établir la durée minimale de malaxage et la charge maximale à introduire. On peut imposer des indices de variabilité aux résultats de ces essais, selon la désignation CRD-C 55 du Corps of Engineers ou ASTM C 94, Annexe A-1.

Généralement, les essais des bétonnières ne concernent que ce matériel : comparaison des constituants et de la qualité du béton se trouvant dans les différentes parties du tambour (début, milieu, fin). Le BCR est souvent fabriqué à l'aide de bétonnières à fonctionnement continu, qui ne sont pas adaptées à cette méthode de contrôle. De plus, le transport et l'épandage du béton peuvent amener des modifications importantes (remalaxage bénéfique, ou ségrégation nuisible). Il importe de trouver une méthode d'évaluation des performances des bétonnières, qui tienne compte des effets de ces manipulations. Une telle méthode prend en compte aussi bien les variations dans une gâchée que les écarts entre gâchées; elle s'applique au malaxage continu ou discontinu.

3.3.6.2. *Training and orientation*

As part of the quality assurance and control program, orientation and training sessions should be held for supervisors, inspectors, and workmen. The differences in technique between conventional and roller-compacted concrete as well as gravel embankments should be discussed and understood by all. Key issues should be explained, such as time limitations for mixing, spreading, and compacting, and concerns about segregation, joint integrity, and curing. It should be emphasized that although RCC looks and acts like gravel fill in its early stage, it is concrete and should be treated with the same respect as conventionally placed concrete.

3.3.6.3. *Grading of aggregates*

The high production rates attainable with RCC require that a large reserve of aggregate be on hand prior to initiating placing. This is also advantageous from the standpoint of grading control since, during aggregate production, material that otherwise may have had to be wasted can be used effectively. Rejected material produced during the startup of aggregate crushing or screening operations can be used to develop the floor of stockpile areas while the necessary adjustments are made to the plant. When material out of specification is temporarily produced, the large piles will often permit spreading the material on the stockpile to produce an acceptably blended material when withdrawn from the pile. This allows systematic and gradual plant adjustments to be made without drastically disrupting production. The stockpiles also permit easier maintenance of uniform moisture and temperature distribution in the aggregate, which in turn provides control of the mixture.

3.3.6.4. *Mixing*

Experience has shown that the appearance of freshly mixed RCC alone does not adequately indicate how thoroughly the material has been mixed. The cement may not be properly distributed in a mixture with uniform appearance, and a mixture with virtually no cement may handle and appear the same as a lean mixture with cement. Mixer proficiency testing is needed to establish minimum mixing times and mixer loading. Variability indexes can be specified for tests under Corps of Engineers designation CRD-C 55 or ASTM C 94 Annex A-1.

Normally, mixer testing is concerned with only the mixer, comparing the constituents and quality of the concrete found in the first, middle, and last parts of mixer drum. Roller compacted concrete is frequently made in continuous mixers which do not lend themselves to such testing. Also, considerable beneficial remixing or damaging segregation can occur in the delivery and spreading process. A modified approach to mixer evaluation which takes into account the effect of handling is appropriate. Such an approach simply combines concerns for "within batch" variations with "batch-to-batch" variation and is applicable to both continuous and batch-type operations.

Dans cette méthode modifiée, présentée dans le rapport « Concrete Report - Willow Creek Dam » [74], un échantillon de BCR est pris sur la levée, immédiatement après épandage mais avant compactage. Cette opération est effectuée à intervalles réguliers trois fois dans chaque poste de production. Ces échantillons sont soumis aux essais : poids unitaire des gros granulats, teneur en eau, teneur en air, poids unitaire du mortier sans air, dosage en ciment. Avec les équipements modernes de laboratoire (fours à micro-ondes, analyseurs de calcium, etc.), les résultats peuvent être obtenus en quelques heures seulement. La comparaison des résultats obtenus sur les trois échantillons permet de déterminer un coefficient de variabilité du béton pendant la journée correspondante. Au début du chantier ou de la campagne de bétonnage, lorsque les résultats d'essais ne sont pas encore disponibles, il convient d'imposer une durée de malaxage suffisamment longue. Ensuite, on réduit cette durée par paliers (par exemple, dix secondes par jour) jusqu'à ce que les résultats des essais montrent que toute réduction supplémentaire de durée entraînera une variabilité excessive du béton produit.

3.3.6.5. Teneur en eau

Il y a deux approches différentes des problèmes de contrôle et de réglage de la teneur en eau de gâchage. L'une correspond aux essais du béton classique, la seconde est basée sur les observations pendant la mise en place. Quelle que soit l'approche utilisée, le plus important est de s'assurer que le BCR présente la consistance nécessaire au bon compactage, sans variation entre gâchées.

Une fois la composition du béton établie, on surveille en permanence la teneur en eau des granulats, avec des réglages du poids des différents composants introduits dans chaque gâchée, afin de maintenir à peu près constantes la consistance et la production. Cette approche présente le grand avantage de permettre un suivi précis des teneurs en eau réelles et une révision périodique de la composition du mélange. Cette méthode indique également la variation de la demande en eau pendant la durée du chantier.

Dans une approche moins scientifique, le chef de chantier ou le surveillant dose l'eau directement à partir d'observations (paragraphe 3.3.4.4. ci-dessus). Cette méthode a donné satisfaction. Elle permet le réglage continu et immédiat de la teneur en eau, sans la complication des essais. Les quantités d'eau de gâchage utilisées seront enregistrées par la centrale, mais la teneur réelle en eau du béton ramenée aux conditions SSD ne sera pas connue avec précision.

La teneur en eau *in situ* peut être connue en même temps, à l'aide du nucléo-densimètre. Il convient d'utiliser un appareil à transmission directe, la longueur de la sonde permettant la pénétration sur toute la hauteur de la levée. On préfère l'appareil à double sonde, qui permet la détermination de la teneur en eau à toute profondeur dans la levée. Il est utile de prévoir une fiche de contrôle, où figurent la valeur de la teneur en eau obtenue dans chaque essai pour chaque journée, l'écart-type, la moyenne et la moyenne mobile des cinquante derniers essais. Ces données sont considérées à la fois comme un historique et comme un guide pour le contrôle de la qualité. La teneur en eau correcte peut varier d'un jour à l'autre ou au cours de la même journée, selon la température, les variations en quantité et qualité de la fraction fine, le temps de transport, etc.

In this modified approach, described in the “ Concrete Report - Willow Creek Dam ” [74], a sample of RCC is taken from the placing area immediately after spreading but prior to rolling. This is done during the first, middle, and last third of a production shift. The samples can be tested for the unit weight of coarse aggregate, moisture, air content, unit weight of the air-free mortar, and the cement content. With modern laboratory equipment such as microwave ovens and calcium analyzers, results can be attained within several hours. By comparing results of the three samples, the coefficient of variability of the mixture can be established during the same day of testing. Early in the job or in the placing season, until test results are available, a sufficiently long mixing time should be required. This can be incrementally decreased by perhaps 10 seconds each day until test results show that excessive variability in the product will occur if mixing time is further reduced.

3.3.6.5. *Moisture*

There have been two different approaches to control and adjustment of mixing water during production. One follows traditional concrete testing concepts while the other reacts to observations during placing. Regardless of which approach is used, the most important measure is to ensure that the RCC has the proper consistency for compaction and is uniform from load to load.

After a mixture has been established, the aggregate moisture content can be continually monitored with adjustments made to the batch weights of various materials so that consistency and mixture yield can be maintained relatively constant. The major advantage to this approach is that an accurate record of the actual water content used is established and can be used as the basis for periodic revision of the mixture design. This practice also indicates the variation in water demand during construction.

A less scientific approach to moisture control is for the placing foreman or inspector to control water addition directly by observation, as discussed in Section 3.3.4.4. This method has been used with acceptable results. It provides continual and immediate control of moisture without complications of testing. The plant will have a record of water additions, but the actual mixing water corrected to SSD condition will not be accurately known.

A record of in-place moisture content can be obtained concurrently with nuclear density testing. A nuclear gage in the direct transmission mode with a probe capable of penetrating the full depth of the lift should be used. The double probe gage which shows moisture determinations at any depth in the lift is preferred. A control chart that shows the moisture content of each test for each day, the standard deviation, the average, and the moving average for the last 50 tests is helpful. Such data should be considered as both historical and as a guide in quality control. The correct moisture of the mixture may vary from day to day and within each day depending on temperature, variations in the quantity and quality of fines, delivery time, etc.

3.3.6.6. *Maniabilité*

On a essayé diverses méthodes de mesure de la maniabilité ou de la compactibilité du BCR. Aucune ne s'est avérée satisfaisante, ou n'a été acceptée par tous. Par exemple, bien que l'essai Vebe modifié (paragraphe 3.3.6.1. ci-dessus) ait été utilisé avec succès pour évaluer la maniabilité de certains BCR, il ne semble pas être adapté au contrôle sur le chantier des bétons secs. Au barrage Willow Creek, les bétons étaient trop raides pour que cet appareil mesure la maniabilité avec une cohérence acceptable.

3.3.6.7. *Densité*

Une densité faible du BCR résulte de diverses déficiences : teneur en eau excessive ou insuffisante, compactage insuffisant, amplitude ou fréquence de vibration incorrecte, retard entre le compactage et l'épandage, mauvaise granulométrie ou ségrégation, résultats d'essais non représentatifs.

Le problème du contrôle de la densité du BCR peut être abordé de deux façons : par la méthode utilisée, ou par les performances obtenues. Pour les contrôles de routine pendant la construction, il est plus facile d'imposer une méthode : nombre minimal de passes avec un certain type de rouleau, et cette méthode a été utilisée avec succès. Parfois, il convient d'effectuer des essais de densité réelle pour s'assurer que le nombre de passes imposé donne effectivement la densité voulue. L'approche consistant à imposer une densité minimale et une densité moyenne, sans se préoccuper du nombre de passes, exige un plus grand nombre d'essais mais permet un contrôle plus rigoureux du béton mis en place.

Il est utile de prévoir des fiches d'enregistrement analogues à celles préconisées pour le contrôle de la teneur en eau. Les résultats des essais de densité peuvent être facilement notés sur un graphique présentant les résultats de chaque essai pour chaque journée, l'écart-type pour chaque journée, la moyenne pour chaque journée, et la moyenne mobile pour les cinquante derniers essais. Un exemple d'une telle fiche est présenté sur la Fig. 12.

3.3.6.8. *Mise en place du béton et liaison entre couches*

Un élément important du contrôle de la qualité du BCR est la surveillance visuelle de l'arrivée, du déversement et de l'épandage du béton. On doit surveiller soigneusement la ségrégation, la pollution et les durées des opérations. Les procédés défectueux seront corrigés immédiatement pour éviter la souillure de la surface de la levée par le matériel de transport, éviter l'éraillure des surfaces nouvellement épandues et compactées, et éviter les joints secs et la ségrégation des couches de BCR.

Pour déceler les joints secs et pour distinguer les joints, nécessitant un traitement spécial en vue d'assurer l'adhérence, de ceux qui peuvent être recouverts sans interposition d'un mélange de liaison, on tient des fiches indiquant le temps écoulé entre levées, ou la maturité de chaque levée avant la mise en place de la levée suivante. Dans ce cas, la maturité est définie comme le cumul des températures horaires moyennes en degrés-heures à la surface du béton. Pour cela, on utilise un thermomètre à enregistrement continu, la sonde étant placée sur la surface du béton. Un traitement spécial de la surface est nécessaire lorsque la maturité dépasse les limites imposées dans le cahier des charges.

3.3.6.6. *Workability*

Various methods have been tried in an effort to measure the workability or compactibility of RCC. None of them have been universally successful or generally accepted. For example, although the modified Vebe test mentioned in Section 3.3.6.1. has been used successfully to duplicate workabilities of some RCC concrete mixtures, it does not appear to be applicable as a field control test of dry RCC mixtures. At Willow Creek Dam, the mixtures were too stiff for the device to measure workability with any degree of consistency.

3.3.6.7. *Density*

Low densities are the result of various deficiencies including high or low moisture, incomplete rolling, incorrect vibratory amplitude or frequency, time delay before rolling, poor gradation or segregation, and nonrepresentative testing.

Two approaches to quality control of RCC density are “ method ” and “ performance ”. For routine control during construction, specifying a method consisting of a minimum number of passes with required rolling equipment is easier and has been used successfully. Occasionally, actual density tests should be performed to verify that the specified passes are routinely providing the required density. Specifying performance with a minimum density and an average required density regardless of the number of passes is an alternate approach that requires more testing but provides tighter control of placement.

A reporting procedure similar to that used for moisture content is useful. Results for density testing can easily be recorded on a control chart that graphically shows the results of each test for each day, the standard deviation for each day, the average for each day, and the moving average of the last 50 tests. An example of such a chart is shown in Fig. 12.

3.3.6.8. *Placing and joint bonding*

An important element of quality control in RCC is visual monitoring of the delivery, dumping, and spreading operation. Segregation, contamination, and timing of operations should be carefully monitored. Deficient procedures should be corrected immediately to prevent contamination of lift surfaces by hauling equipment, to prevent the freshly spread compacted surfaces from fraying, and to avoid cold joints and segregation of RCC layers.

To identify cold joints and to distinguish between joints which require special treatment for bond and those which can be covered without a bonding mix, a record should be kept of the elapsed time between lifts or of the maturity of each lift prior to placing the subsequent lift. Maturity, in this case, is defined as the accumulated average hourly temperature in degree (F) hours at the concrete surface. This is easily determined using a continuous recording thermometer with the measuring probe mounted on the RCC surface. Special surface treatment must be used as the maturity exceeds the limits specified in the design requirements.

3.3.6.9. *Maîtrise de la température*

Puisque de nombreuses spécifications relatives aux ouvrages massifs en béton limitent souvent la température de mise en place du BCR, il faut établir une procédure permettant de réduire et de maîtriser la température du béton. La température sera enregistrée à la mise en place.

Le prérefroidissement des gros granulats peut être effectué au moyen du même matériel que celui utilisé pour le béton de masse classique, mais le refroidissement des granulats de faible dimension peut s'avérer difficile, compte tenu de la plus forte teneur en fines. Le gâchage du BCR avec de la glace ou de l'eau refroidie a un effet moindre que dans le cas de béton ordinaire, à cause de la plus faible teneur en eau du BCR. Du point de vue du contrôle de la qualité, une attention spéciale est à porter en cas d'utilisation de glace. En effet, compte tenu de la faible fluidité ou de la faible teneur en coulis, un malaxage supplémentaire peut être nécessaire pour s'assurer que toute la glace est fondue avant la sortie de la bétonnière. Une autre méthode de refroidissement utilise l'injection directe d'azote liquide.

Le BCR n'est pas adapté à la plupart des méthodes traditionnelles de pré-refroidissement ou de post-refroidissement. Les serpentins noyés pour le post-refroidissement ne sont pas pratiques, compte tenu de la méthode et de la rapidité de la construction.

Heureusement, l'expérience ainsi que les études théoriques montrent que, dans les climats tempérés, on peut obtenir une température satisfaisante lors de la mise en place en fabriquant la plus grande partie des granulats pendant la saison froide, et en les stockant au frais. L'utilisation du BCR en masse dans les climats présentant de grands écarts de température peut nécessiter des mesures spéciales.

3.3.6.10. *Fréquence des essais pendant la construction*

Il est essentiel de pratiquer des essais divers et nombreux, au cours de la construction, pour assurer un bon contrôle de la qualité du BCR et pour garantir la conformité avec les paramètres du projet. Le programme d'essais de contrôle de la qualité est prévu par le responsable du projet, avec accord du directeur du chantier en ce qui concerne le programme final. Le Tableau suivant est un exemple de la fréquence des essais à effectuer sur le chantier.

3.3.6.9. *Temperature control*

Since many specifications for mass structures limit the placing temperature of the RCC, a procedure must be established to lower and control the temperature of the mix. Temperature must be recorded at the time of placement.

Precooling coarse aggregates through chillers can be done in a manner similar to that used for conventionally mixed and placed mass concrete, but chilling of the small-size aggregates may be difficult because of the typically higher fines content. The benefit of precooling the concrete by the addition of ice or chilled water is less when compared to conventional concrete because of the lower water content in RCC mixtures. From a quality control standpoint, special attention should be given to the mixture if the use of ice is attempted. Because there is little slurry or fluidity, additional mixing may be necessary to ensure that all of the ice melts prior to discharging the mixture. Another method of cooling is by direct injection of liquid nitrogen.

Roller compacted concrete is not suited to most of the traditional methods of precooling or postcooling. Embedding cooling coils for postcooling is not practical for the rates and construction techniques used.

Fortunately, both experience and studies have shown that sufficiently low placing temperatures can be achieved in temperate regions by manufacturing much of the aggregate during the coldest parts of the year and stockpiling it in its cool condition. Use of RCC mass construction in climates with wide temperature differences may require special measures.

3.3.6.10. *Frequency of testing during construction*

A battery of field tests during construction is vital to ensure quality control of the RCC and provide assurance that the design parameters are being met. The testing program for quality control purposes should be initiated by the designer with concurrence of the final program by the construction manager. The following chart provides an example of the frequency of field tests.

Exemple de fréquences d'essais sur le chantier

ESSAIS	FRÉQUENCES
Granulométrie (ASTM C 136) Fraction < 75 microns (tamis n° 200) (ASTM C 117)	Pour chaque poste de fabrication de granulats et de mise en place du BCR, au moins un essai pour chaque tas de granulats, avec essai de conformité de granulométrie des granulats introduits dans la bétonnière.
Teneur en eau des granulats (ASTM C 566 ou C 70)	Chaque jour de mise en place du BCR, un essai pour chaque tas de granulats.
Indice de plasticité (ASTM D 4318)	Pour les dix premiers postes de fabrication de BCR, un essai par poste; ensuite un essai par semaine (ou par groupe de douze postes s'ils couvrent moins d'une semaine).
Température (thermomètre)	Deux contrôles par poste de bétonnage : un à la centrale à béton et un sur le barrage. Enregistrement continu à la surface de la levée pendant les temps morts de bétonnage.
Teneur en eau et densité du BCR (ASTM D 3017) (ASTM D 2922, Méthode B)	Quatre essais par poste ou au moins trois par levée, à l'aide d'un nucléo-densimètre dans la zone de mise en place.

3.3.6.11. *Contrôle des niveaux et des alignements*

Le matériel de compactage utilisé pour le BCR est insensible aux petites variations progressives d'épaisseur de levée. Une tolérance d'environ $\pm 15\%$ de cette épaisseur est raisonnable, les limites maximales étant de 50 mm pour une levée de 300 mm. Cette précision est facilement obtenue à l'aide d'un niveau laser standard, à faisceau rotatif, et d'un assistant muni d'une cible qui guide le conducteur de l'engin d'épandage (voir Photo 1). Pour améliorer la précision, on peut munir les engins d'une lame guidée par laser, mais ce n'est généralement pas nécessaire.

Dans les zones à proximité de la fondation rocheuse où la levée diminue d'épaisseur, la levée est terminée avant d'atteindre une minceur excessive (égale approximativement à deux fois le diamètre des granulats les plus gros). Il en résulte une surépaisseur de la levée suivante.

Le contrôle des alignements peut se faire par relevé topographique traditionnel ou au laser, selon les besoins techniques et d'aspect de l'ouvrage terminé. Une attention particulière est portée à l'arête supérieure des parements inclinés non

Example of field testing frequency

TEST	FREQUENCY
Aggregate Grading (ASTM C 136) Material < 75 µm (No. 200 Sieve) (ASTM C 117)	A minimum of once each shift of aggregate production and RCC placement for the individual aggregate stockpiles and the designated, batched gradation.
Aggregate Moisture Determination (ASTM C 566 or C 70)	Once each day of RCC placement for each aggregate stockpile.
Plasticity Index (ASTM D 4318)	Once each shift for the first 10 shifts of RCC production, and then once each week or 12 shifts, whichever comes first.
Temperature (Thermometer)	Once each shift of RCC placement at both the plant and the placement location. Continuous recording on the lift surface between placements.
RCC Moisture and Density (ASTM D 3017) (ASTM D 2922, Method B)	Four times each shift or at least three times per lift using the nuclear gage at the placement location.

3.3.6.11. *Grade and alignment control*

The compaction equipment used in RCC construction is typically insensitive to minor and gradual variations in lift thickness. A tolerance of about $\pm 15\%$ of the lift thickness is reasonable, with maximum limits of 50 mm (2 in) in a 300 mm (12 in) lift. Such limits are easily achieved by using a standard rotating beam laser level and a rodman with a receiver target who spot-checks and assists the spreading equipment operator, as seen on Photograph 1. More accurate control can be achieved through the use of a laser-controlled blade on traction equipment, but generally this will be unnecessary.

Where an RCC lift becomes thinner as it spreads into a rising bedrock foundation area, the lift should be terminated before it becomes too thin (approximately twice the maximum aggregate size). This results in a thicker section of the subsequent lift in the area where the previous lift terminates.

Alignment control can be provided by laser or by conventional survey, depending upon what is required considering both appearance of the finished structure and technical requirements. The top edge of unformed sloping faces should be given

coffrés. La méthode suivante a été utilisée avec succès : chaque couche est exécutée légèrement au-delà de la ligne théorique, et puis une ligne est tracée à la peinture à la surface de la levée pour matérialiser le bord de la couche suivante, afin de guider la mise en place. Il est extrêmement difficile de combler une zone étroite si la largeur d'une couche n'est pas épandue et compactée jusqu'à la ligne théorique.

3.3.6.12. *Planches d'essais*

Comme dans le cas des remblais d'essais qui sont une aide précieuse pour l'assurance de la qualité de construction d'un barrage en remblai, des planches d'essais ou de « démonstration » sont importantes dans la construction en BCR. On a réalisé beaucoup de planches d'essais à grande échelle dans des buts de recherche et pour guider les projeteurs dans l'utilisation de cette nouvelle technologie; mais, en outre, on doit demander à l'Entrepreneur, responsable d'un nouveau barrage, de construire une planche d'essais en vue de certains objectifs importants. Un tel programme doit être combiné avec le programme de formation des inspecteurs, des contrôleurs et des ouvriers (paragraphe 3.3.6.2.). Cette planche d'essais doit reproduire les conditions réelles de mise en place et contribuer à l'expérience de tous les intervenants. Elle sera implantée à proximité du barrage, et on adoptera le même matériel que celui qui sera utilisé pour le début de la construction du barrage. La surveillance sera exercée par le même personnel. Une planche d'essais peut comporter dix à douze levées, sur une surface de 6 m × 12 m, avec les rampes d'accès nécessaires.

Les problèmes à étudier sont notamment : l'optimisation de la composition et de la teneur en eau du BCR, la ségrégation, le compactage, le coffrage et le traitement des parements, la vérification des cotes et des alignements, l'étalonnage des appareils de mesures nucléaires, et le rodage du laboratoire d'essais, autant d'aspects qui sont bénéfiques à la qualité de l'ouvrage achevé.

3.4. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT

3.4.1. Généralités

L'évaluation du comportement réel et prévu du BCR incorporé dans un barrage soulève des problèmes similaires et également différents de ceux posés par l'évaluation du béton mis en place suivant les méthodes traditionnelles. En principe, les études, le choix des matériaux, les dosages et les méthodes de construction sont conformes aux documents contractuels, établis selon les recommandations présentées dans les chapitres précédents. L'évaluation du comportement implique de vérifier que les opérations de contrôle de la qualité et les programmes d'assurance de la qualité se sont déroulés de telle façon que le béton dans l'ouvrage achevé présente les caractéristiques voulues. Par exemple, si l'on doit utiliser un ciment résistant aux sulfates, on suppose que ce ciment est imposé par le cahier des charges, acheté, livré et utilisé dans le barrage, et qu'il est conforme au produit défini par les spécifications.

En dernier lieu, les évaluations du comportement sont effectuées pour déterminer dans quelle mesure les caractéristiques prévues et réalisées sont satisfaisantes.

particular attention. A successful procedure has been to overbuild slightly each layer past the design line, and then paint a line on top of the lift at the location where the subsequent layer terminates to act as a placing guide. Building back a narrow area is extremely difficult if the width of any layer is not spread and compacted out to the design line.

3.3.6.12. *Test section*

Just as the use of test fills is valuable for quality assurance in embankment dam construction, test sections or “ demonstration ” sections are important in RCC construction. Numerous large-scale test sections have been made for research purposes and by designers in this developing technology, but the contractor on each new dam should be required to build a test section with important objectives in mind. Such a program should be integrated with the training and orientation of the supervisors, inspectors, and workmen, as discussed in Section 3.3.6.2. The test section should reproduce actual placement conditions and provide experience for all concerned. Accordingly, it should be located near the dam and utilize the same equipment to be used for the start of the dam. Supervision should be by the same people. Such a test section could consist of a 6- by 12-m (20- by 40-ft) area 10 to 12 lifts high with associated access ramps.

Points of concern will include optimization of the RCC mixture and water content, segregation control, compaction, face treatment and forming, line and grade control, calibration of nuclear gages, and a shakedown of the testing laboratory, all leading to quality dam building.

3.4. PERFORMANCE EVALUATION

3.4.1. General

The evaluation of actual and anticipated performance of the RCC that has been incorporated into a dam poses issues and problems that are similar as well as dissimilar to those posed by an evaluation of concrete placed by traditional methods. The premise is that proper planning, materials selection, mixture proportioning, and construction practices were all followed as set forth in the contract documents as referenced in the preceding chapters. Performance evaluation involves the verification that quality-control operations and quality-assurance programs functioned so that the concrete in the finished structure has the appropriate properties. For example, if sulfate-resisting cement was needed, it is assumed that it was specified, procured, delivered, and used, and is the product intended by the specification.

In the final analysis, performance evaluations are made to determine how well designed and constructed (as-built) features actually function.

3.4.2. Comportement de l'ouvrage et des matériaux

Pendant la construction, on procède à la prise d'une variété d'échantillons et à la fabrication d'échantillons cylindriques du béton. L'examen et l'essai de ces échantillons doivent confirmer que le béton du barrage est satisfaisant. Un supplément de confirmation et de vérification peut être obtenu en prélevant des carottes dans l'ouvrage achevé pour des essais supplémentaires. Le document ASTM C 823 présente des procédures d'examen et de prise d'échantillons de béton durci dans les ouvrages, et le document ASTM C 856 concerne l'examen pétrographique du béton durci.

Des appareils de mesure du comportement du barrage peuvent être noyés dans le béton, comme dans les autres types de barrage en béton, mais il faut tenir compte de la nécessité de minimiser les entraves au rythme de construction. Les appareils d'auscultation sont présentés en détail dans le paragraphe 3.1.10.

Les ingénieurs s'intéressent particulièrement au régime thermique des barrages BCR, lors de la construction et du remplissage de la retenue, dans le but d'éviter la fissuration. Les cycles de température dans les différentes sections de l'ouvrage sont enregistrés par des thermocouples noyés dans le béton pendant la construction.

Dans cette technique en pleine évolution, il est intéressant, en particulier, d'examiner les différents comportements des barrages, tels Copperfield et Urugua-i, construits en zone tropicale, et des ouvrages réalisés en zone froide, tels le barrage Upper Stillwater à une altitude de 2 286 m et le barrage Roberston au Québec.

3.4.3. Étanchéité

La perméabilité et les percolations sont deux facteurs affectant tous les barrages en béton, mais sont particulièrement importantes dans les barrages BCR. On prévoit des moyens de mesure des percolations et de détermination de leur origine, dès la mise en eau et pendant la vie de l'ouvrage. La variation des percolations, en quantité et qualité, en fonction du temps, ainsi que les résultats des mesures de débits, sont suivis pendant un à cinq ans, et plus longtemps si nécessaire.

3.5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

3.5.1. Généralités

Un grand nombre d'études approfondies ont été effectuées sur le BCR en tant que matériau pour ouvrages massifs, en laboratoire et sur des planches d'essais au chantier. Pour l'essentiel, ces travaux ont eu lieu aux États-Unis, au Royaume-Uni et au Japon.

Les premières planches d'essais aux États-Unis ont été réalisées au barrage Time Ford par la Tennessee Valley Authority (TVA), en 1971 [9], et aux barrages Jackson (Mississippi) [45] et Lost Creek (Oregon) par l'US Army Corps of Engineers (Corps) en 1972 et 1973 [24]. Les premières idées sur le dosage et les méthodes de construction du BCR ont été mises au point dans ces planches d'essais.

Avant la réalisation de barrages-poids en BCR, le Corps of Engineers a construit des planches d'essais pour le barrage Willow Creek à Portland (Oregon) et a conduit des études de résistance à l'érosion au barrage Detroit (Oregon) en 1980

3.4.2. Structural and materials behavior

During construction, a variety of samples are taken and concrete cylinders fabricated. The examination and testing of these provide confirmation that the concrete as installed is proper. Further confirmation and verification may be provided by removing core samples from the completed structure for further testing. ASTM Designation : C 823 covers procedures for examination and sampling of hardened concrete in constructions, and ASTM Designation : C 856 covers petrographic examination of hardened concrete.

Embedment of instruments to monitor structural behavior can be handled similarly to that for other types of concrete dams, except that the necessity for minimizing impediments to rapid construction should be considered. Instrumentation is described in detail in Section 3.1.10.

Of particular interest to engineers is the thermal regime of RCC dams as they are constructed and impound water, in the interest of preventing structural cracks. The temperature cycle in the various sections of the mass should be recorded from readings of embedded thermocouples installed during construction.

Of special interest in this developing technology is the contrasting performance of dams such as Copperfield and Urugua-i built in the tropics and cold-weather structures such as Upper Stillwater Dam at elevation 2 286 m (7 500 ft) and Robertson Dam in Quebec.

3.4.3. Watertightness

Permeability and seepage, while factors present in all concrete dams, are of particular concern in RCC dams. Provisions should be made for measuring seepage and determining the source immediately upon first reservoir filling and during the life of the dam. The quantity and quality of seepage change over time, and seepage measurements should be continued for 1 to 5 years, and longer if results warrant.

3.5. RESEARCH AND DEVELOPMENT

3.5.1. General

Extensive research on RCC for use in mass fill has been carried out in both the laboratory and in test sections in the field. Most of the work has been accomplished in the United States, the United Kingdom, and Japan.

Early test sections in the United States included RCC placements at Tims Ford Dam by the Tennessee Valley Authority (TVA) in 1971 [9] and at Jackson, Mississippi [45], and Lost Creek Dam in Oregon by the US Army Corps of Engineers (Corps) in 1972 and 1973 [24]. In these test sections, the initial RCC mixture proportioning concepts and construction methods were developed.

In preparation for actual concrete gravity dam projects using RCC, the Corps constructed its test section for Willow Creek Dam at Portland, Oregon, and conducted erosion resistance research at Detroit Dam, also in Oregon, in 1980 [60].

[60]. L'US Bureau of Reclamation (USBR) a construit des planches d'essais pour le barrage Upper Stillwater sur le chantier, en Utah, en 1981 [15, 50]. Des planches d'essais et les études associées, pour les barrages projetés par des bureaux d'études privés, ont été achevées en 1983 et 1984 aux chantiers de (ou à proximité) : Ringwood (New Jersey); Austin (Texas); Parachute (Colorado) et Winchester (Kentucky).

La TVA [7, 8] et le Corps [73] ont commencé des études en laboratoire sur le dosage et les propriétés du BCR au cours des années 70, l'USBR faisant de même en 1980 [15].

De 1971 à 1977, des recherches importantes ont été effectuées au Royaume-Uni, dans les laboratoires de l'Université de Newcastle-sur-Tyne [54]. Plus tard, à la fin des années 70, un important programme de recherches sur le BCR à forte teneur en cendres volantes fut lancé par CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) et conduit par « South West Water Authority », avec la coopération de « Cement and Concrete Association » [17]. Outre ces études en laboratoire, une planche d'essais fut construite au « Tamar Treatment Works » (Cornouailles), en 1976 [19], et une expérience en vraie grandeur conduite sur le site du barrage Wimbleball en 1979 [16].

3.5.2. Études terminées

Une grande partie des travaux de recherche et de développement du BCR, conduits en laboratoire jusqu'à ce jour, ont porté sur la mise au point de dosages corrects et la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Sur le chantier, on a expérimenté divers moyens de malaxage, de transport, d'épandage et de compactage du BCR, ainsi que des méthodes de réalisation de parements verticaux ou fortement inclinés pour les ouvrages-poids. Les dosages d'un grand nombre de bétons et les caractéristiques obtenues lors de la période initiale du développement du BCR ont été réunis par Dunstan (Royaume-Uni) [17]. Des travaux plus récents, effectués aux États-Unis, ont été publiés par le Corps [68] et l'USBR [15]. Quelques résultats de ces recherches sur les dosages et sur les caractéristiques fondamentales du BCR sont aussi présentés au paragraphe 3.2. ci-dessus.

Les méthodes de construction et d'autres considérations sont présentées au paragraphe 3.3. ci-dessus. Nous n'y reviendrons pas. Cependant, certains éléments de recherche et de développement ont été l'objet d'une attention particulière et méritent d'être examinés ici.

3.5.2.1. Liaison entre couches

La mauvaise liaison entre couches de BCR fut décelée lors des premiers essais sur les chantiers et au cours des essais en laboratoire conduits aux États-Unis [8], au Japon [33] et au Royaume-Uni [18].

Les essais effectués par Dunstan [18] ont confirmé que la liaison entre les couches était améliorée :

- par un intervalle de temps réduit entre la mise en place de deux couches successives;
- par une augmentation du rapport pâte-mortier du BCR.

The US Bureau of Reclamation (USBR) constructed its test section for Upper Stillwater Dam at the damsite in Utah in 1981 [15,50]. Test sections and associated research for dams designed by private engineering consulting firms were completed in 1983 and 1984 at damsites at or near Ringwood, New Jersey; Austin, Texas; Parachute, Colorado; and Winchester, Kentucky.

In the laboratory, both the TVA [7, 8] and the Corps [73] initiated research on RCC mixture proportioning and properties in the 1970's, with the USBR starting similar laboratory testing in 1980 [15].

During 1971-77, notable research was done in the UK at the laboratories at the University of Newcastle-upon-Tyne [54]. Subsequently, in the late 1970's, an extensive research program on high fly ash content RCC was sponsored by the Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) and conducted by the South West Water Authority with assistance from the Cement and Concrete Association [17]. In addition to laboratory investigations, a trial section was completed at the Tamar Treatment Works in Cornwall in 1976 [19], and a full-scale trial was completed at the Wimbleball Dam site in 1979 [16].

3.5.2. Completed research

Much of the research and development laboratory work on RCC to date has been aimed at developing mixture proportions together with quantifying physical and mechanical properties of the material. In the field, various means of mixing, transporting, spreading, and compacting RCC have been tested along with methods for constructing vertical or steeply sloped faces for gravity structures. The proportions for many mixtures and properties achieved in the early development of RCC have been compiled by Dunstan of the UK [17]. More recent works on RCC mixtures in the United States have been published by the Corps [68] and the USBR [15]. Some of the results of mixture proportioning development and basic properties are also contained in Section 3.2.

Construction methods and considerations are described in Section 3.3. These items will not be repeated here. There are, however, certain research and development items which have received considerable attention and warrant further discussion.

3.5.2.1. Bond between layers

Poor bond between successive layers of RCC was recognized in early field trials and laboratory tests in the United States [8], Japan [33], and the United Kingdom [18].

Tests by Dunstan [18] confirmed that bond between lifts was increased with (1) decreased time between placement of the two layers, and (2) increased paste-mortar ratio of the RCC mixture.

Au Centre d'Études (Waterways Experiment Station) du Corps, on a montré que la résistance à la traction des joints non traités augmentait avec la teneur en pâte et la qualité de cette pâte. Ainsi, cette résistance, comparativement au béton constituant, augmente de 25 % pour un BCR relativement pauvre en ciment, jusqu'à environ 50 % pour un BCR plus riche et jusqu'à 75 % pour un béton classique. Les essais sur des carottes prélevées dans le barrage Willow Creek confirment cette augmentation de la résistance à la traction directe des joints avec l'augmentation de la teneur en liant [74].

La résistance au cisaillement le long du contact entre couches de BCR est traitée au paragraphe 3.1.3. ci-dessus. Les recommandations et les valeurs présentées proviennent d'essais biaxiaux du BCR, avec et sans confinement. Pour la plupart, les échantillons étaient de grands blocs découpés dans les ouvrages ou dans les planches d'essais. Certains essais ont été effectués sur des carottes. L'utilisation entre les couches d'un mortier, présentant un certain affaissement, s'est montrée efficace pour rétablir la liaison perdue du fait de la maturité.

Une petite planche d'essais, construite par un bureau d'études et un laboratoire privés à Austin (Texas), a montré qu'une couche de ciment, sec ou aspergé d'eau, améliorait la liaison, comme les mortiers et les bétons décrits précédemment [73].

3.5.2.2. *Résistance à l'érosion*

Les observations des ouvrages terminés, ainsi que les études en laboratoire, montrent que le BCR présente une excellente résistance à l'érosion, égale, ou peut-être supérieure, à celle du béton traditionnel.

Au barrage de Tarbela, certaines zones du BCR ont été directement soumises aux écoulements dans le bassin d'amortissement, sans érosion notable. Pendant toute une année, la surface en BCR du réservoir de North Fork, au barrage de Toutle River (Washington), a été soumise à un écoulement continu, à vitesse élevée (estimée à 4,6 à 6 m/s), qui chariait des gros blocs rocheux et des cendres provenant de l'éruption du volcan du Mont Saint-Helens. On n'a observé que des érosions superficielles ponctuelles sur le déversoir. En 1985, le barrage Kerrville (Texas) a été submergé par une lame de 4,5 m pendant une crue survenue un mois seulement après la mise en place du BCR. Le comportement du couronnement et du parement aval, sans protection, a été satisfaisant.

Les essais d'érosion conduits par le Corps au barrage Detroit (Oregon) et au Centre d'Essais WES consistaient à soumettre des panneaux en BCR à l'action de jets d'eau de vitesse élevée. Au Centre d'Essais, le taux d'érosion constaté a été nul pour un BCR lisse, et de 0,24 kg/m²/h pour les surfaces rugueuses, avec une vitesse d'eau de 11 m/s pendant 14 heures [11]. Une série de panneaux en BCR au barrage Detroit, a été soumise à des vitesses allant jusqu'à 30 m/s pendant 39 heures, sous une charge de 55 m [72] : seule une pierre de 20 mm a été perdue. Les dimensions de ces panneaux étaient d'environ 0,6 m de large par 3,0 m de long. Une deuxième série d'essais sur un autre BCR a été caractérisée par une charge de 41 m et une vitesse de 21 à 28 m/s; après 41 heures, la surface a présenté un aspect ressemblant au résultat d'un sablage.

The Corps at its Waterways Experiment Station determined that the tensile strength of the untreated joints, compared to the parent concrete, increased with paste content and quality from a value of approximately 25 % for relatively lean RCC to about 50 % for richer RCC to 75 % for conventional concrete. Tests of cores from Willow Creek Dam confirm the increase in direct tensile strength across joints with increasing cementitious content [74].

Shear resistance along the interface between RCC layers is discussed in Section 3.1.3. The recommendations and values given there are based on unconfined and confined biaxial tests of RCC. Most of the samples were large blocks cut from actual placements or test sections. Some tests were on cores. Placement of the slumpable bedding mix between layers has been effective in reestablishing bond lost due to maturity.

A small test section constructed by a private consulting firm and testing lab at Austin, Texas, determined that dry cement or cement sprinkled with water would also improve bond similar to the mortar and concrete mixtures previously described [73].

3.5.2.2. *Erosion resistance*

Performance of completed projects, together with laboratory studies, shows that RCC has excellent erosion resistance properties that equal or possibly exceed those of conventional concrete.

Some of the “ unfaced ” RCC at Tarbela Dam has been subjected to plunge pool flows with no appreciable erosion. For a period of 1 year, the RCC surface on the overflow spillway at the North Fork of Toutle River Detention Dam in Washington was subjected to continuous, high-velocity [estimated at 4.6 to 6 m/s (15 to 20 ft/s)], abrasive flow consisting of large rocks and ash from the Mt. St. Helens volcanic eruption. Only minor isolated surface erosion was evident in the spillway. In 1985 the Kerrville Dam, Texas, was overtopped by about 4.5 m (14.5 ft) of water during a flood only 1 month after the RCC was placed. The unprotected RCC crest and downstream surface performed well.

Erosion tests by the Corps at both Detroit Dam in Oregon and at the Corps' Waterway Experiment Station (WES) consisted of subjecting RCC panels to jets of high-velocity water. At WES the erosion rate was zero for smooth RCC and 0.24 kg/m²-h (0.05 lb/ft²-h) for rough surfaces at a velocity of 11 m/s (35 ft/s) for 14 hours [11]. One set of RCC panels at Detroit Dam was subjected to velocities up to 30 m/s (98 ft/s) for 39 hours under a 55 m (180 ft) head [72], with the loss of one 20 mm (0.8 in) stone. The panels were approximately 0.6 m (2 ft) wide by 3.0 m (10 ft) long. A second set of tests on a different RCC mixture used a head of 41 m (135 ft) and velocity of 21 to 28 m/s (69 to 92 ft/s). A sandblasted texture resulted after 41 hours.

3.5.2.3. Perméabilité

D'anciens essais effectués par Portland Cement Association (PCA) sur un sol-ciment ressemblant à un BCR ont permis de constater que le matériau présentait une perméabilité anisotrope. En effet, le débit était plus important dans la direction horizontale que dans la direction verticale. De plus, le débit était plus grand lorsque la couche suivante était appliquée après un délai de 6 heures, ce qui indiquait probablement une moins bonne liaison au contact.

Les planches d'essais au barrage Wimbleball (Royaume-Uni) [12] et à Austin (Texas) [73] ont montré que la perméabilité au contact entre levées s'approchait de celle du béton constituant si le joint était bien fermé par le BCR lui-même ou par les différents traitements de surface appliqués.

Des études sur les BCR à forte teneur en cendres volantes, conduites par Dunstan [18] et l'USBR [15] démontrent que la perméabilité horizontale est analogue à celle d'un béton de masse traditionnel, variant de 10^{-9} à 10^{-11} cm/s. Les BCR comportant moins de ciment et de cendres volantes présentent, en général, une perméabilité plus élevée, variant de 10^{-2} cm/s à 10^{-6} cm/s (Dunstan, 1988). Dans les cas d'une faible perméabilité, une partie des percolations est concentrée sur les surfaces de contact à liaison faible ou nulle. La perméabilité et l'étanchéité sont discutées dans le document « Étanchéité et maîtrise des percolations dans les barrages en béton compacté au rouleau » [62].

3.5.2.4. Résistance aux cycles gel-dégel

La résistance au gel-dégel est un problème important pour les surfaces horizontales à l'air libre. La pérennité du BCR présente un grand intérêt, étant donné que la plupart des chercheurs ont indiqué que l'entraînement d'air dans un BCR sec était difficile.

Les études du Corps ont indiqué qu'un BCR sans air occlus présentait une plus grande résistance au gel-dégel qu'un BCR comportant 5 à 6 % d'air, mais tous les deux étaient qualifiés de béton à faible résistance au gel-dégel. Il apparaît que la résistance du BCR au gel-dégel peut augmenter avec sa résistance à la compression. Le BCR soumis aux essais de laboratoire standards préconisés par l'ASTM a présenté, à l'état saturé, une faible résistance. Cependant, lorsque les échantillons ne sont mouillés qu'à la surface (comme dans leur milieu naturel) ils ont subi peu de dégâts. Dans la pratique, les revêtements en BCR en Colombie Britannique (Canada), où le climat est rigoureux, ont résisté pendant des années, sans dégâts apparents. Au barrage Willow Creek (États-Unis), le parement aval est continuellement mouillé par les percolations traversant les joints de reprise. Plusieurs cycles de gel-dégel ont lieu chaque hiver, mais apparemment sans causer de dégâts. De même, des panneaux d'essais en BCR près de Portland, Oregon (États-Unis) ont subi des cycles naturels de mouillage-séchage et de gel-dégel pendant plusieurs années, sans dégâts visibles.

3.5.3. Recherches futures

Les progrès réalisés dans l'utilisation du BCR continuent à un rythme rapide. Cependant, ces progrès exigent un programme de recherches continu et dynamique pour trouver les réponses aux nombreux problèmes qui se posent.

3.5.2.3. *Permeability*

Early tests by the Portland Cement Association (PCA) on a soil-cement mixture that was similar to an RCC mixture found the material to be anisotropic with respect to permeability. There was greater flow in the horizontal direction than in the compacted vertical direction. Also, flow increased with a 6-hour delay between placing the next layer, likely indicating a decreased bond at the lift line.

The test sections at Wimbleball Dam, UK [12], and at Austin, Texas [73], determined that the permeability at the lift line approached that of the parent material if the joint was well bonded by the mixture itself or a variety of surface treatments.

Research on high fly ash content RCC by both Dunstan [18] and the USBR [15] shows the horizontal permeability to be similar to that of conventional mass concrete and in the range between 10^{-9} and 10^{-11} cm/s (4×10^{-10} and 4×10^{-12} in/s). Mixtures with less cement and fly ash generally have been shown to be more permeable, typically ranging from 10^{-2} cm/s (4×10^{-3} in/s) to 10^{-6} cm/s (4×10^{-7} in/s) [Dunstan, 1988]. Low values of the permeability indicate some of the seepage is occurring at unbonded or poorly bonded lift lines. A discussion of permeability and watertightness is given in "Watertightness and Seepage Control in Roller Compacted Concrete Dams" [62].

3.5.2.4. *Resistance to freezing and thawing*

Resistance to freezing and thawing is a primary concern for exposed horizontal surfaces. Durability of RCC has attracted some interest as most researchers have indicated that entraining air into dry RCC mixtures is difficult.

Research by the Corps has indicated that a non-air-entrained RCC has greater resistance to freezing and thawing than an RCC with 5 to 6 % entrained air, although both mixtures were described as having low resistance. It appears that the resistance of RCC to freezing and thawing may increase with its compressive strength. RCC subjected to standard ASTM laboratory tests while saturated has shown poor resistance. However, when subjected to freeze-thaw cycles while being surface wet to simulate the natural environment, little damage resulted. In practice, RCC pavements in the severe Canadian weather of British Columbia have held up for years with no apparent damage. At Willow Creek Dam, USA, the downstream face is subjected to continual moisture from seepage through lift joints. Many freeze-thaw cycles occur each winter, but no apparent damage has developed. Similarly, RCC test panels near Portland, Oregon (USA), have undergone years of natural wet-dry and freeze-thaw cycles with no visible damage.

3.5.3. **Future research**

Advancements in the use of RCC continue to be made at a rapid pace. Notwithstanding, such progress needs a continuing and active research program to provide answers to the myriad of questions that arise.

De nombreux domaines nécessitent la poursuite ou la mise en œuvre de nouvelles études et recherches. Des méthodes normalisées de fabrication des éprouvettes cylindriques doivent être étudiées. Cela simplifierait et faciliterait les programmes de contrôle de la qualité. La pérennité du BCR est toujours une préoccupation et des études visant à une meilleure connaissance des facteurs d'influence doivent être poursuivies. Les mérites comparés des rouleaux lourds statiques et des rouleaux vibrants plus légers sont toujours sujets à débat. En outre, le rôle joué dans le compactage du BCR par les caractéristiques, en amplitude et en fréquence, des rouleaux vibrants mérite d'être mieux connu.

Enfin, il faut poursuivre les études et les recherches pour mieux connaître le mécanisme de liaison au droit des joints entre levées.

There are several areas where new or continuing research and study are needed. Standard methods for fabricating test cylinders need to be established. This would simplify and aid in quality control programs. Durability of RCC continues to pose concerns, and studies to better understand the factors that affect durability need to continue. Debate continues on the relative merits of using heavy-weight static rollers versus lighter vibratory rollers. The role played in compaction of RCC by the frequency and amplitude characteristics of vibratory rollers needs to be better understood.

Finally, more research and studies are needed to understand the mechanism of lift joint bonding.

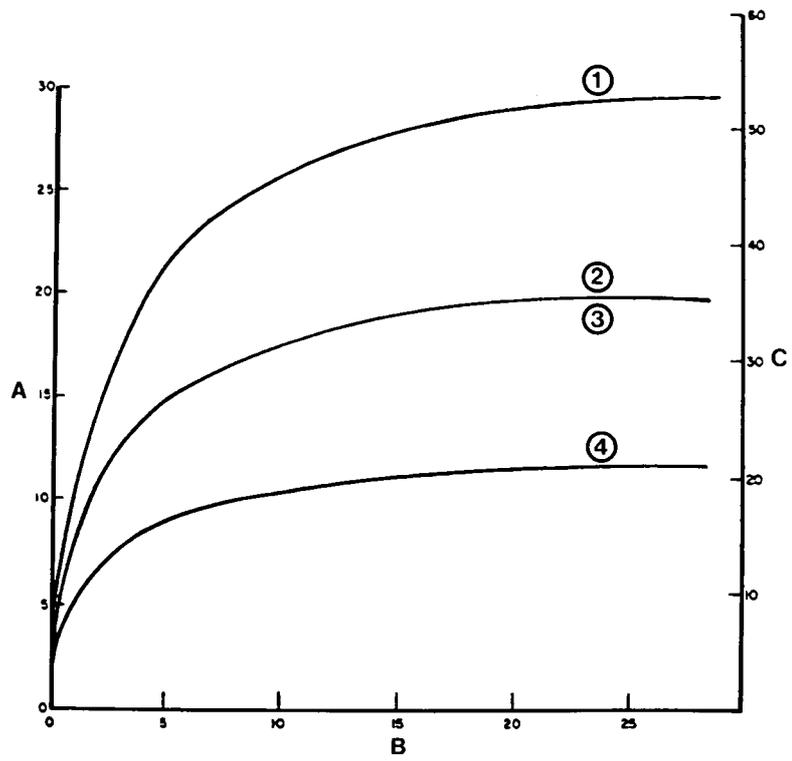


Fig. 1

Willow Creek Dam RCC Mixtures - Adiabatic Temperature Rise.
Barrage Willow Creek - Compositions de BCR
Augmentation adiabatique de la température.

(A) Temperature rise (°C).

(B) Age (days).

(C) Temperature rise (°F).

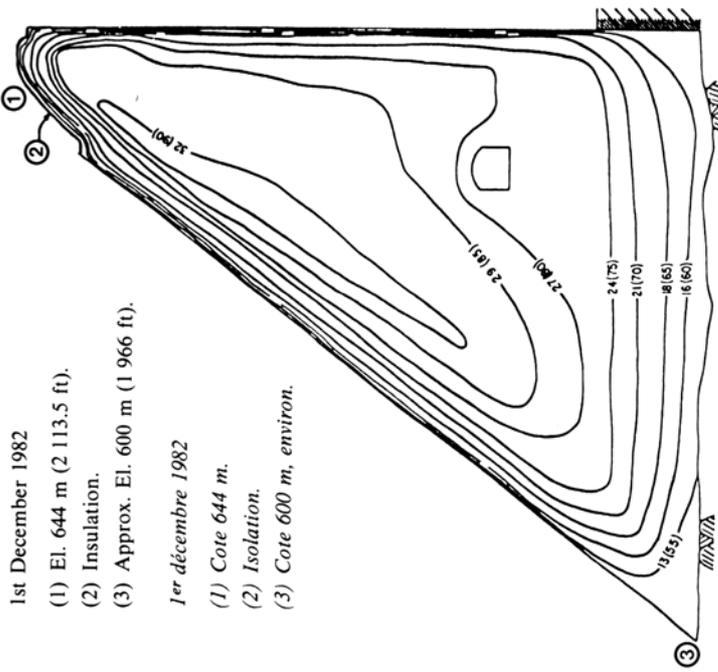
- | | |
|--|---|
| (1) 143 kg (315 lb) Cement type II
61 kg (135 lb) Ash class F | Spillway facing concrete. |
| (2) 79 kg (175 lb) Cement type II
36 kg (80 lb) Ash class F | Downstream facing concrete. |
| (3) 79 kg (175 lb) Cement type II | Facing against upstream prefabricated panels. |
| (4) 36 kg (80 lb) Cement type II
15 kg (32 lb) Ash class F | Interior mix. |

(A) Augmentation de température (°C).

(B) Age (jours).

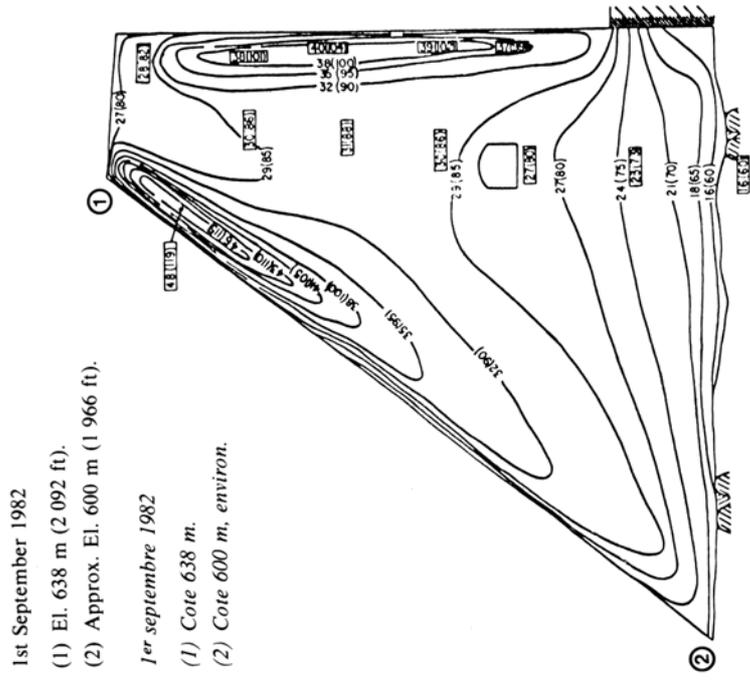
(C) Augmentation de température (°F).

- | | |
|--|---|
| <i>(1) 143 kg de ciment type II
61 kg de cendre classe F</i> | <i>Béton de parement de l'évacuateur de crue.</i> |
| <i>(2) 79 kg de ciment type II
36 kg de cendre classe F</i> | <i>Béton du parement aval.</i> |
| <i>(3) 79 kg de ciment type II</i> | <i>Parement contre les panneaux préfabriqués amont.</i> |
| <i>(4) 36 kg de ciment type II
15 kg de cendre classe F</i> | <i>Béton interne.</i> |



- 1st December 1982
- (1) El. 644 m (2 113.5 ft).
 - (2) Insulation.
 - (3) Approx. El. 600 m (1 966 ft).
- 1er décembre 1982
- (1) Cote 644 m.
 - (2) Isolation.
 - (3) Cote 600 m, environ.

(B)



- 1st September 1982
- (1) El. 638 m (2 092 ft).
 - (2) Approx. El. 600 m (1 966 ft).
- 1er septembre 1982
- (1) Cote 638 m.
 - (2) Cote 600 m, environ.

(A)

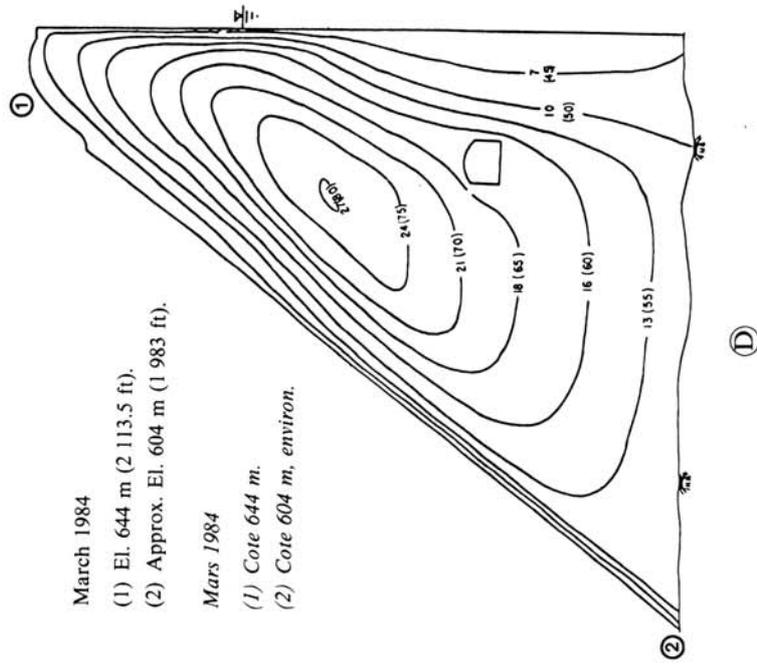
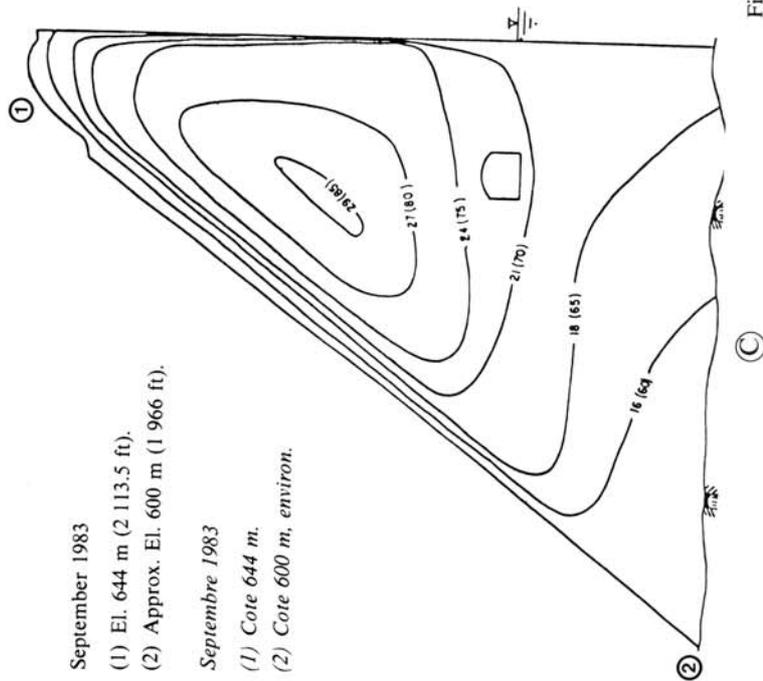


Fig. 2-A/2-D

Willow Creek Dam (Heppner, Oregon) - Spillway Thermal Contours in °C (°F).
 Barrage Willow Creek (Heppner, Oregon) - Isothermes de l'évacuateur de crue, en °C (°F).

37 (99) indicates temperature predicted by design computations for the mix, location and time.

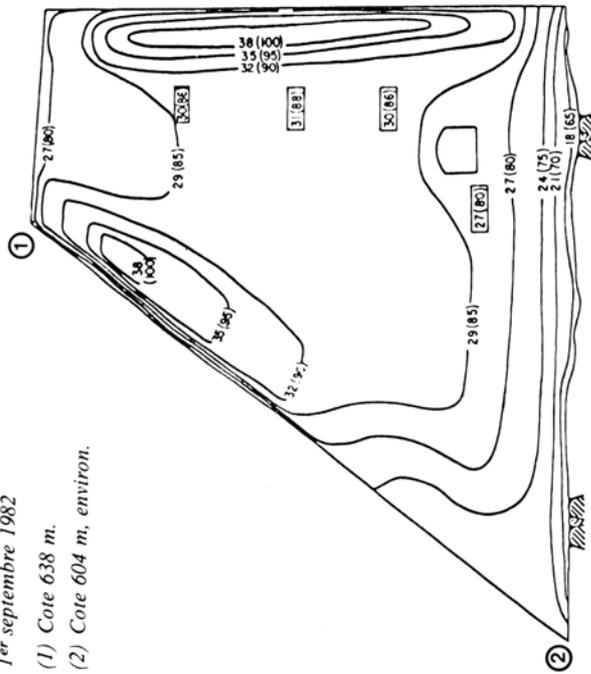
37 (99) indique la température en °C (°F) prévue par les calculs du projet pour le type de béton utilisé, la situation dans l'ouvrage et la date de bétonnage.

1st September 1982

- (1) El. 638 m (2 092 ft).
- (2) Approx. El. 604 m (1 983 ft).

1^{er} septembre 1982

- (1) Cote 638 m.
- (2) Cote 604 m, environ.

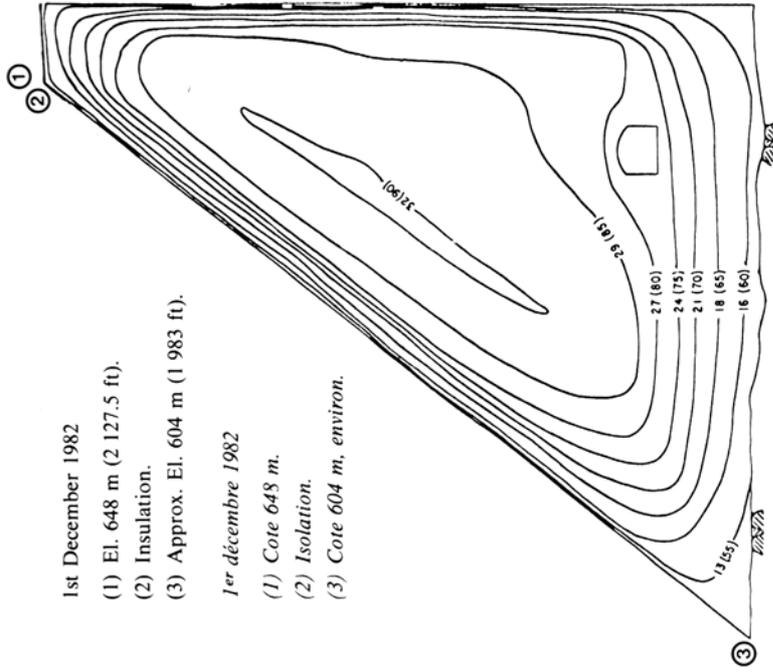


1st December 1982

- (1) El. 648 m (2 127.5 ft).
- (2) Insulation.
- (3) Approx. El. 604 m (1 983 ft).

1^{er} décembre 1982

- (1) Cote 648 m.
- (2) Isolation.
- (3) Cote 604 m, environ.



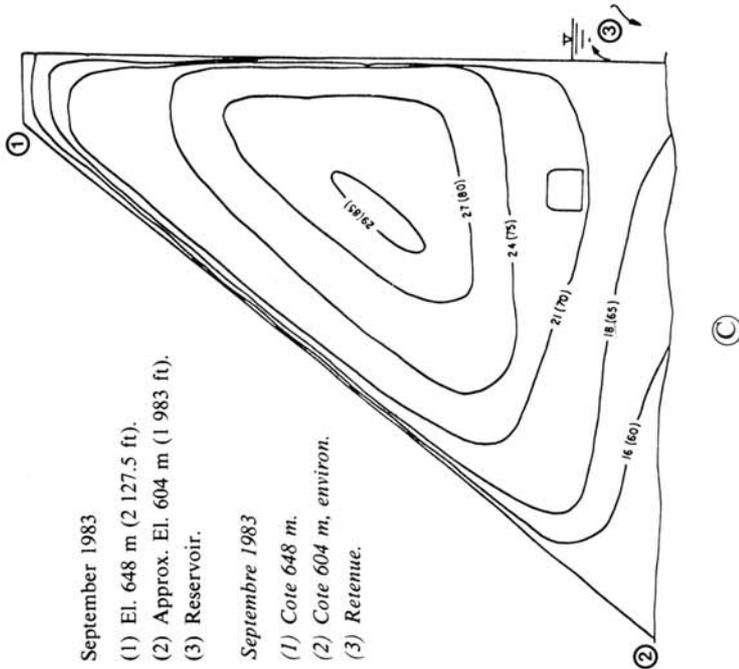


Fig. 3-A/3-D

Willow Creek Dam (Heppner, Oregon) - Non-Overflow Section Thermal Contours in °C (°F)
 Barrage Willow Creek (Heppner, Oregon) - Isothermes pour un profil non déversant en °C (°F).

30 (86) indicates temperature predicted by design computations for the mix location and time.

30 (86) indique la température en °C (°F) prévue par les calculs du projet pour le type de béton utilisé, la situation dans l'ouvrage et la date de bétonnage.

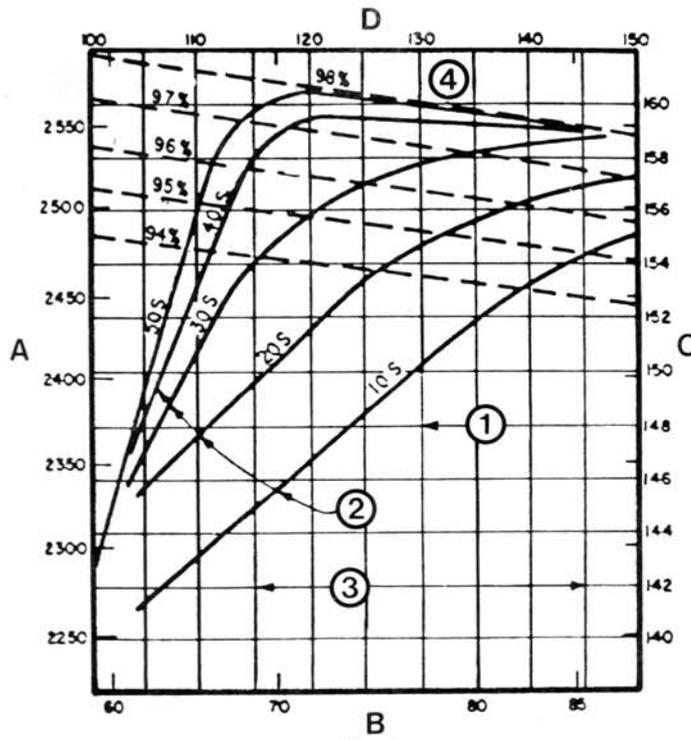


Fig. 4

Effect of vibration time and water content on the compacted density of fly ash concrete.

Effet de la durée de vibration et du dosage en eau sur la densité compactée du béton aux cendres volantes.

Ingredients <i>Composants</i>	Weight <i>Poids</i> kg (lb)	Volume m ³ (ft ³)
38 mm (1 1/2 in) MSA 38 mm dim. max. gran.	1 159 (2 556)	0.41 (14.5)
Sand/Sable	587 (1 293)	0.22 (7.9)
Fly ash/Cendres volantes	152 (336)	0.066 (2.34)

Note : Aggregates are manufactured.
Les granulats sont fabriqués.

- (A) Density of flyash-crete in kg/m³.
 (B) Water content in kg/m³.
 (C) Density in lb/ft³.
 (D) Water content in lb/yd³.
 (1) Optimum.
 (2) Vibration time.
 (3) Usable range.
 (4) Air free.

- (A) Densité du béton aux cendres volantes (kg/m³).
 (B) Dosage en eau (kg/m³).
 (C) Densité du béton (lb/ft³).
 (D) Dosage en eau (lb/yd³).
 (1) Optimum.
 (2) Durée de vibration.
 (3) Plage d'utilisation.
 (4) Exempt d'air.

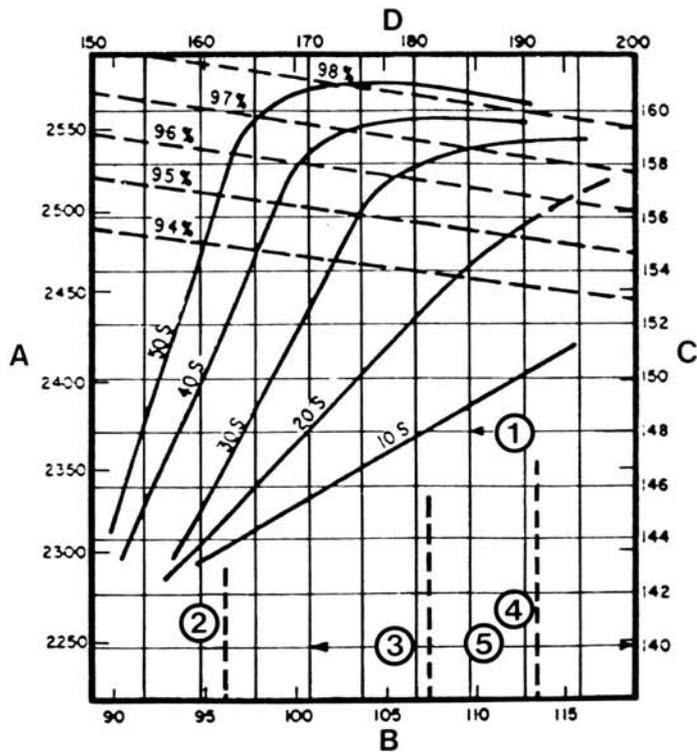


Fig. 5

Effect of vibration time and water content on the compacted density of portland cement concrete.

Effet de la durée de vibration et du dosage en eau sur la densité compactée du béton au ciment Portland.

Ingredients <i>Composants</i>	Weight <i>Poids</i> kg (lb)	Volume m ³ (ft ³)
38 mm (1 1/2 in) MSA 38 mm dim. max. gran.	1 159 (2 556)	0.41 (14.5)
Sand/Sable	587 (1 293)	0.21 (7.51)

Note : Aggregates are manufactured.
Les granulats sont fabriqués.

- (A) Density of concrete in kg/m³.
 (B) Water content in kg/m³.
 (C) Density in lb/ft³.
 (D) Water content in lb/yd³.
 (1) Optimum.
 (2) Cement 117 kg (258 lb).
 (3) Cement 139 kg (306 lb).
 (4) Cement 124 kg (274 lb).
 (5) Usable range.

- (A) Densité du béton (kg/m³).
 (B) Dosage en eau (kg/m³).
 (C) Densité du béton (lb/ft³).
 (D) Dosage en eau (lb/yd³).
 (1) Optimum.
 (2) Ciment 117 kg (258 lb).
 (3) Ciment 139 kg (306 lb).
 (4) Ciment 124 kg (274 lb).
 (5) Plage d'utilisation.

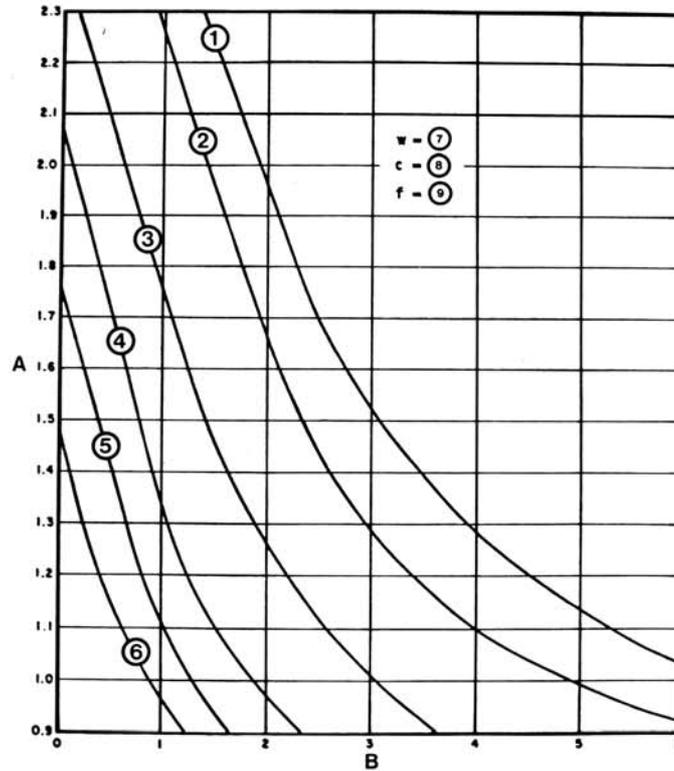


Fig. 6

Proportioning curves for equal strength concrete
Type II cement.

*Courbes de dosage pour des résistances égales du béton
Ciment du type II.*

(A) $\frac{w}{c + f}$ by volume (Absolute).

(B) $\frac{f}{c}$ by volume.

(1) 13.8 MPa (2 000 lb/in²) 180 days.

(2) 13.8 MPa (2 000 lb/in²) 90 days.

(3) 20.7 MPa (3 000 lb/in²) 90 days.

(4) 20.7 MPa (3 000 lb/in²) 28 days.

(5) 27.6 MPa (4 000 lb/in²) 28 days.

(6) 34.5 MPa (5 000 lb/in²) 28 days.

(7) water (w).

(8) cement (c).

(9) fly ash or pozzolan (f).

(A) $\frac{e}{c + p}$ en volume (absolu).

(B) $\frac{p}{c}$ en volume.

(1) 13,8 MPa à 180 jours.

(2) 13,8 MPa à 90 jours.

(3) 20,7 MPa à 90 jours.

(4) 20,7 MPa à 28 jours.

(5) 27,6 MPa à 28 jours.

(6) 34,5 MPa à 28 jours.

(7) eau (e).

(8) ciment (c).

(9) cendre volante ou pouzzolane (p).

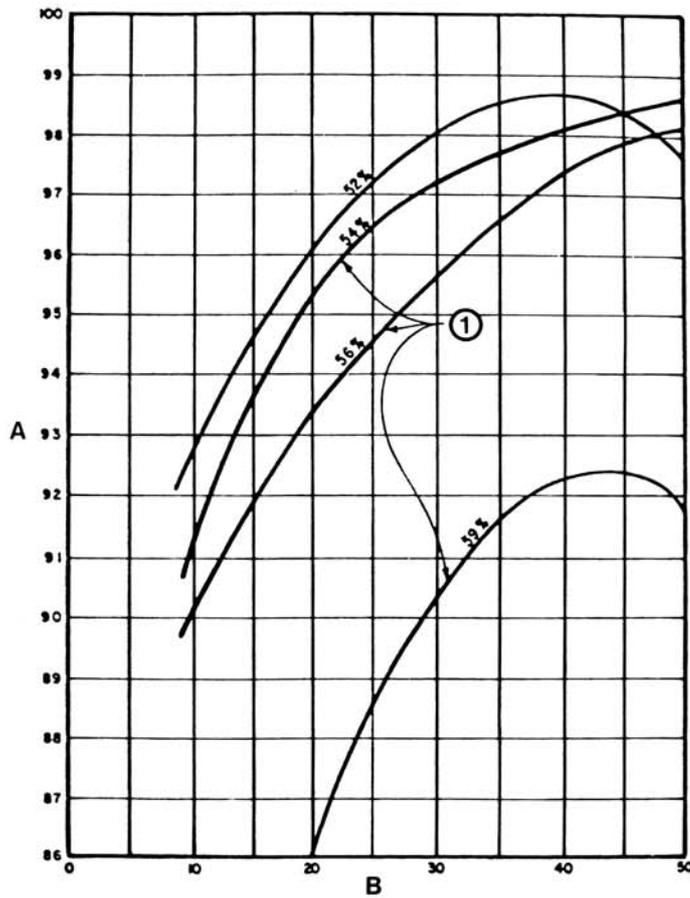


Fig. 7

Effect of coarse aggregate volume on compaction.
Effet du volume de gros granulats sur le compactage.

Mortar mix (air free) :

Sand = 62.8 % by volume.
 Water = 16.5 % by volume.
 Fly ash = 20.7 % by volume.
 Cement = 0

Mortier (exempt d'air) :

Sable = 62.8 % en volume.
Eau = 16,5 % en volume.
Cendre volante = 20,7 % en volume.
Ciment = 0.

(A) Compacted density as a percent of air-free density.

(A) Densité après compactage, en % de la densité (exempte d'air).

(B) Vibration time in seconds.

(B) Durée de vibration, en secondes.

(1) 38 mm (1 1/2 in.) coarse aggregate volume in percent of unit volume.

(1) Volume de gros granulats (38 mm), en % du volume unitaire.

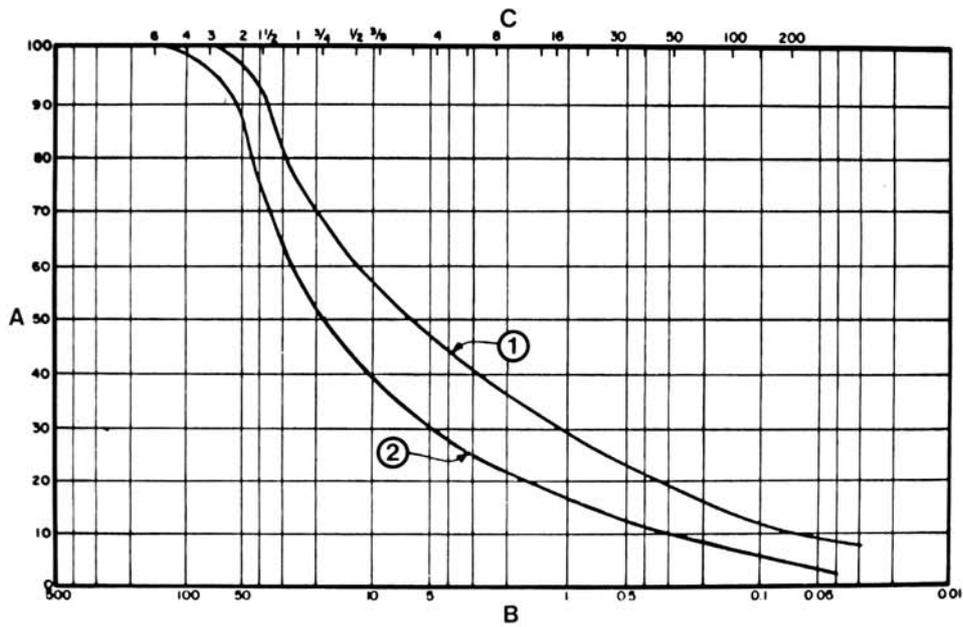


Fig. 8

Aggregates having gradings falling within these limits can be used to produce good, mixable and compactible RCC.

Les granulats dont la granulométrie entre dans ces limites peuvent être utilisés pour fabriquer un BCR de bonne qualité, facile à malaxer et à compacter.

- | | |
|--|---|
| (A) Percent finer by weight. | (A) % de granulats plus fins (en poids). |
| (B) Grain size in millimeters. | (B) Dimension des granulats, en mm. |
| (C) US standard sieve : opening in inches and numbers. | (C) Tamis standard US : ouverture en pouces et numéros. |
| (1) Upper limit. | (1) Limite supérieure. |
| (2) Lower limit. | (2) Limite inférieure. |

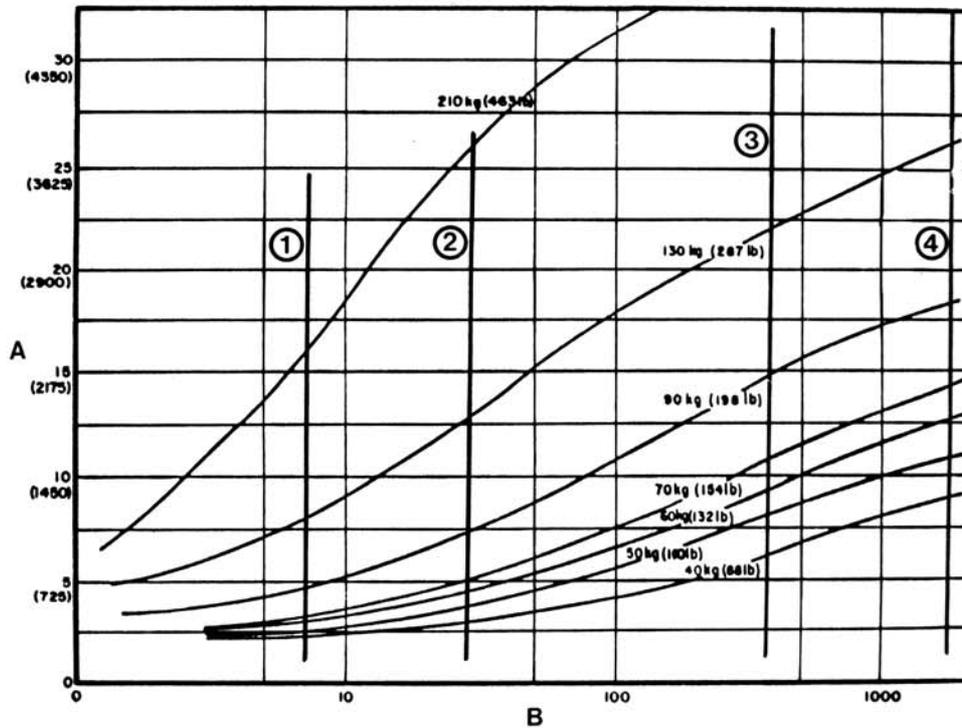


Fig. 9

Example of plotted compressive strength data obtained from tests of RCC mixtures with varying cement contents.

Exemple de graphiques de résistances à la compression obtenus à partir d'essais sur des BCR avec des dosages variables en ciment.

(A) Compressive strength - MPa (lb/in²).

(A) Résistance à la compression - MPa (lb/in²).

(B) Age (days).

(B) Age (jours).

(1) 1 week.

(1) 1 semaine.

(2) 1 month.

(2) 1 mois.

(3) 1 year.

(3) 1 an.

(4) 5 years.

(4) 5 ans.

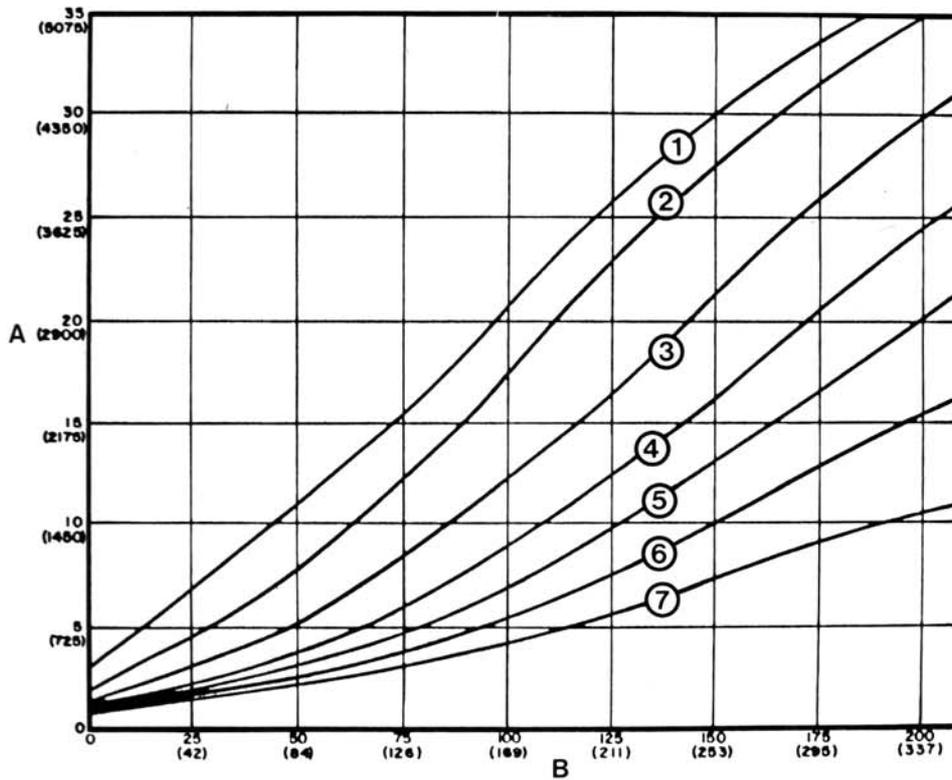


Fig. 10

Typical RCC strength curves that can be developed from tests conducted on concretes with varying proportions of cement.

Courbes caractéristiques de résistance du BCR pouvant être obtenues à partir d'essais sur des bétons avec des dosages variables en ciment.

(A) Static compressive strength - MPa (lb/in²).

(A) Résistance statique à la compression - MPa (lb/in²).

(B) Cement content - kg/m³ (lb/yd³).

(B) Dosage en ciment - kg/m³ (lb/yd³).

(1) 5 years.

(1) 5 ans.

(2) 1 year.

(2) 1 an.

(3) 90 days.

(3) 90 jours.

(4) 28 days.

(4) 28 jours.

(5) 14 days.

(5) 14 jours.

(6) 7 days.

(6) 7 jours.

(7) 3 days.

(7) 3 jours.

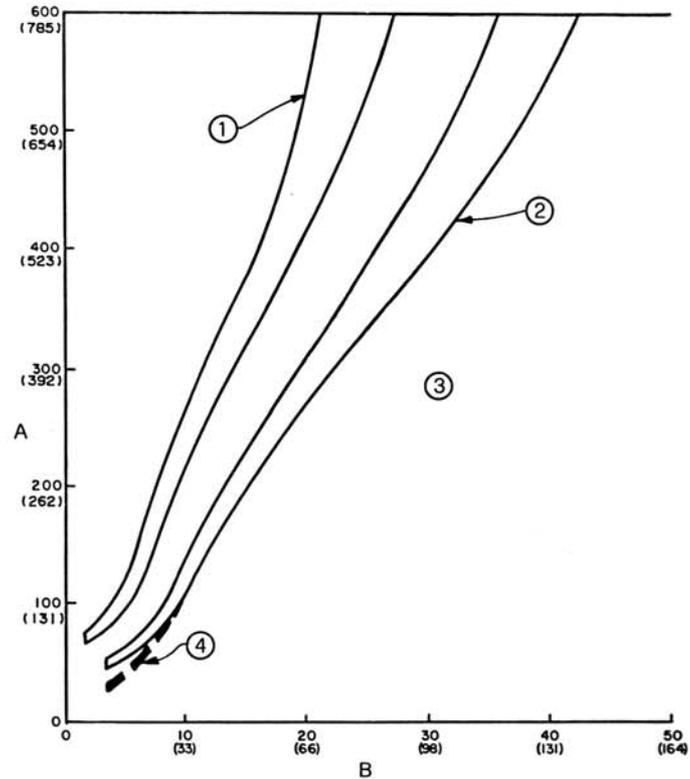


Fig. 11

Effect of dam width and delivery system
on RCC placing rates.

*Effet de la largeur du barrage et du dispositif de transport du BCR
sur les cadences de bétonnage.*

(A) Placing rate - cm/h (in/h).

(B) Dam width - m (ft).

(1) Total conveyor delivery.

(2) Haul vehicles on dam.

(3) Assumed precast panels and bedding mix.

(4) With conventional facing mix.

(A) *Vitesse de mise en place - cm/h (in/h).*

(B) *Largeur du barrage - m (ft).*

(1) *Transport total par tapis.*

(2) *Camions sur le barrage.*

(3) *Avec panneaux préfabriqués et couches de liaison.*

(4) *Avec béton classique de parement.*

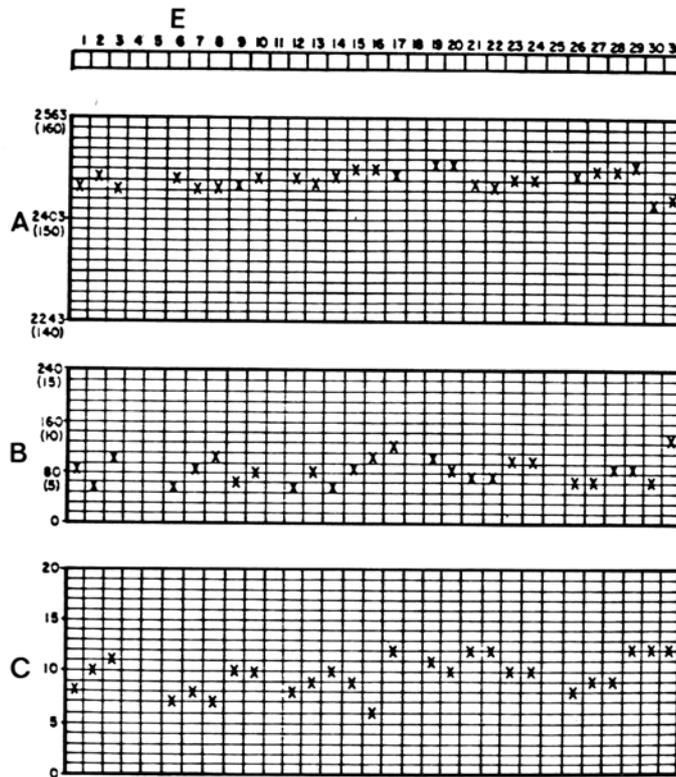


Fig. 12

Willow Creek Dam in-site density control chart.

Barrage Willow Creek - Graphique de contrôle de la densité in situ.

- | | |
|--|---|
| (A) Average density - kg/m^3 (lb/ft^3). | (A) Densité moyenne - kg/m^3 (lb/ft^3). |
| (B) Standard deviation - kg/m^3 (lb/ft^3). | (B) Écart-type - kg/m^3 (lb/ft^3). |
| (C) Number of tests. | (C) Nombre d'essais. |
| (E) Date : Month July, year 1982. | (E) Date : mois de juillet 1982. |



Photo 1

Bulldozer spreading RCC.
Bulldozer épandant du BCR.



Photo 2

Double-drum, self-propelled
vibratory roller compacting RCC.
*Rouleau vibrant automoteur,
à double tambour, compactant du BCR.*

4. BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU POUR BARRAGES (RCD)

4.1. CONSIDÉRATIONS ET PARAMÈTRES RELATIFS AU PROJET DE L'OUVRAGE

4.1.1. Généralités

La sécurité des barrages revêt une très grande importance pour la société, par suite des catastrophes possibles. Les projeteurs doivent toujours rester conscients de ce fait, surtout lorsqu'une nouvelle technologie est appliquée.

Les critères de projet des barrages concernent la stabilité mécanique et l'étanchéité de l'ouvrage. La sûreté des barrages en béton traditionnel est confirmée, depuis de très nombreuses années, et la même doctrine de projet sera appliquée aux projets des barrages RCD. Ainsi, les économies que permet la construction des barrages RCD seront atteintes avec le même niveau de qualité que celui exigé pour les barrages en béton traditionnel.

On demande que les barrages RCD présentent les mêmes caractéristiques de pérennité et d'étanchéité que les barrages en béton traditionnel. Ainsi, on place du béton traditionnel sur les parements des barrages RCD, mais l'épaisseur minimale de cette zone externe en béton traditionnel doit être étudiée afin de réduire les prix. Les galeries de visite sont nécessaires dans les barrages RCD, mais elles seront réduites au minimum pour faciliter la construction. La disposition générale des galeries et des ouvrages de restitution et de vidange sera également étudiée.

4.1.2. Considérations sur le projet

La doctrine relative au projet de barrages RCD est essentiellement la même que celle suivie pour les barrages-poids en béton traditionnel. Les critères de stabilité des barrages RCD sont les suivants :

- Absence de traction sur le parement amont.
- Résistance suffisante au glissement du barrage et de sa fondation.
- Contraintes dans le barrage à l'intérieur de limites admissibles.

La bonne qualité du béton compacté au rouleau (RCD) permet son utilisation dans des barrages de grande hauteur qui exigent des résistances mécaniques élevées du béton.

La maîtrise des températures, pour garantir la bonne tenue du barrage, est l'élément le plus important dans un projet de barrage RCD. Les éléments à étudier sont : dosage en ciment, épaisseur des levées, intervalle de temps entre les levées, refroidissement, cure, isolation thermique. Les joints de contraction transversaux sont nécessaires pour éviter la fissuration d'origine thermique [22].

4. ROLLER COMPACTED DAM CONCRETE (RCD)

4.1. STRUCTURAL DESIGN PARAMETERS AND CONSIDERATIONS

4.1.1. General

The safety of dams is of great concern to society because of the great potential for disaster. Dam designers should always be conscious of this fact, especially when a new technology is applied.

The design requirements of dams consist of the structural stability and watertightness. The reliability of conventional concrete dams has been socially confirmed over a long time, and their design philosophy should be applied in the design of RCD dams. The economy of RCD dam construction should, therefore, be achieved maintaining the same quality as required in conventional concrete dams.

The same durability and watertightness are required in RCD dams as in conventional concrete dams. Therefore, exterior conventional concrete should be placed in RCC dams, although the minimum thickness of exterior conventional concrete should be studied in order to achieve economy. Inspection galleries are necessary in RCD dams, but the service galleries should be minimized to achieve efficient RCD dam construction. The layout of galleries and outlet works should also be studied.

4.1.2. Design considerations

The design philosophy of RCD dams is essentially the same as that of conventional concrete gravity dams. The stability requirements of RCD dams are that :

- No tensile stress should be produced in the upstream face of the dam.
- The dam and its foundation rock should have enough resistance to sliding.
- The stresses in the dam should be within the allowable limits.

The good quality of RCD permits it to be applied to high dams that require high concrete strengths.

Temperature control to ensure the integrity of the dams is the most important element in the design of RCD dams. The unit cement content, lift thickness, placing interval, cooling, curing, and insulation are factors to be studied. The installation of transverse contraction joints is necessary to prevent temperature cracks [22].

4.1.3. Stabilité au glissement

Les plans de cisaillement potentiels à étudier dans le calcul de la stabilité des barrages en béton sont : plan de contact entre le barrage et la fondation rocheuse, plans de faiblesse dans la fondation, joints de reprise dans le barrage [64]. Le coefficient de sécurité au frottement et au cisaillement est utilisé dans les calculs.

La résistance au cisaillement du béton RCD est égale à environ $1/5^e$ de sa résistance à la compression. Celle des joints de reprise peut être augmentée en intercalant un mortier entre les levées, la résistance au cisaillement des joints ainsi traités variant de $1/5^e$ à $1/6^e$ de la résistance à la compression [34, 78]. Compte tenu de cette valeur élevée de la résistance au cisaillement, le béton RCD est adapté à la construction des barrages de grande hauteur.

4.1.4. Stabilité au renversement

La stabilité du barrage vis-à-vis du renversement est garantie s'il y a absence de tractions sur le parement amont. La mise en place d'un béton traditionnel externe et d'un mortier entre les levées peut garantir la même valeur des sous-pressions que dans les barrages en béton traditionnel, et aucun problème spécial ne se pose dans le projet des barrages RCD. La densité du béton RCD bien compacté est la même que celle d'un béton traditionnel [33]. Pour cette raison, il n'est pas nécessaire d'augmenter la section transversale des barrages RCD pour éviter le renversement.

4.1.5. Variations de température et de volume [46, 48]

Le béton dégage une grande quantité de chaleur d'hydratation pendant son durcissement. Il s'ensuit une forte augmentation de la température à l'intérieur des barrages en béton [44]. Des fissures peuvent apparaître lorsque le béton est refroidi. Il faut éviter la fissuration des barrages en béton car celle-ci risque de réduire la stabilité, l'étanchéité et la pérennité de l'ouvrage, sans parler des détériorations sur le plan esthétique. Des mesures visant à maîtriser les effets thermiques sont essentielles dans la construction des barrages en béton.

Les mesures à prendre sont les suivantes [22] :

— Réduction de l'accumulation de la chaleur dans le béton. Les mesures à prendre comprennent notamment la réduction du type et de la quantité de ciment, de l'épaisseur des levées et du rythme de mise en place, ainsi que l'adoption du pré-refroidissement.

— Utilisation de joints de contraction (retrait). Il faut prévoir des étanchéités pour ces joints.

— Maîtrise du taux de développement des contraintes résultant des variations de température. Parmi les moyens d'action disponibles, on peut citer l'utilisation des caractéristiques de fluage du béton, l'isolation thermique des surfaces des levées et le choix correct du rythme de mise en place du béton.

Lors de la réalisation du barrage RCD Tamagawa [25], la température maximale du béton RCD a été limitée à 30 °C ou moins à la base du barrage, dans la zone où l'effet de confinement externe était le plus grand, et à 35 °C ou moins dans les autres zones (Fig. 13) [79]. La baisse de température sur la surface de la levée exposée à l'air a également été limitée à 5 °C.

4.1.3. Sliding stability

The potential shear planes to be studied in the stability analysis of the concrete dams are the contact plane of the dam and the bedrock, weak layers in the bedrock, and lift joints in the dam [64]. The shear friction factor of safety is used in the analysis.

The shear strength of RCD is about one-fifth that of compressive strength. The shear strength along the lift joints of RCD can be increased by placing mortar between lifts. The shear strength of such lift joints is between one-fifth and one-sixth that of compressive strength [34, 78]. Because of such a high shear strength, RCD can be applied in high dams.

4.1.4. Stability against overturning

The stability against overturning of the dam can be confirmed by producing no tensile stress in the upstream face of the dam. Placement of exterior conventional concrete and placement of mortar between the lifts can guarantee the same uplift pressure as in conventional concrete dams, and no special concerns are necessary in the design of RCD dams. The unit weight of well-consolidated RCD is the same as that of conventional concrete [33]. A larger cross section is, therefore, unnecessary in RCD dams against overturning.

4.1.5. Thermal and volume change [46, 48]

Concrete generates a considerable amount of heat of hydration during hardening. It causes a large increase in temperature in concrete dams [44]. Cracks may be induced when the concrete is cooled. Cracks in concrete dams should be avoided because of the potential loss of structural stability, watertightness, and durability, as well as a decline in their appearance. Temperature control measures are essential in concrete dam construction.

Measures for temperature control are as follows [22] :

- Reducing heat accumulation in the concrete. — The measures include the restriction of the type and amount of cement in the concrete, the lift thickness and placing speed, and adoption of precooling.

- Installing contraction joints. — They must be accompanied by waterstops.

- Controlling the rate of stress development to temperature change. — The measures include the utilization of creep properties of concrete, insulation of lift surfaces, and control of the concrete placement rate.

In the construction of Tamagawa RCD dam [25], the maximum temperature of RCD was controlled to 30 °C (80 °F) or less near the base of the dam where the external restraint was the largest, and to 35 °C (95 °F) or less at the other parts of the dam Fig. 13 [79]. The temperature drop at the lift surface during exposure was also controlled within 5 °C (9 °F).

Les autres mesures d'ordre thermique prises au barrage Tamagawa ont été les suivantes [5, 25, 26, 66, 78] :

- Choix d'un ciment Portland, à chaleur d'hydratation modérée, mélangé à des cendres volantes (30 % du ciment ont été remplacés par des cendres volantes).
- Teneur en liant (ciment et cendres volantes) limitée à 130 kg/m³.

- Épaisseur des levées limitée à 0,75 m à la partie inférieure du barrage, et à 1 m à la partie supérieure.

- Intervalle de temps entre mise en place des levées limité (voir Tableau 4) selon la saison et la cote. La température moyenne sur le site était de 3 °C en hiver et 23 °C en été.

- Refroidissement de la surface du béton RCD pour réduire son échauffement en été, le rythme de mise en place du béton étant maintenu.

- Maintien du béton RCD à l'état humide, au moyen d'un brouillard d'eau juste après la mise en place, et ensuite par aspersion. L'eau était refroidie à 15 °C.

- Refroidissement à 4 °C de l'eau de gâchage, en été, pour réduire la température de mise en place du béton RCD.

- Isolation thermique des surfaces soumises à une longue exposition à l'air pour éviter une chute rapide de la température du béton RCD. Cette isolation a été utilisée lorsque le bétonnage était interrompu, en hiver ou lorsque les ouvrages de vidange et de restitution étaient en cours d'installation.

Tableau 4. — Intervalles de temps entre mise en place des levées de béton RCD

Température maximale admissible	Dates	Intervalles (jours)	
		Minimum	Maximum
30 °C	1/4 - 31/5	2	—
	1/6 - 30/6	3	—
	1/7 - 10/9	4	14
	11/9 - 30/9	3	10
	1/10 - 30/11		
35 °C	1/4 - 30/6	2	—
	1/7 - 31/8	3	14
	1/9 - 30/11	2	10

4.1.6. Joints de contraction

En ce qui concerne la fissuration thermique, l'avantage du barrage RCD est que le béton est mis en place de manière continue et que les joints transversaux ne sont pas longtemps exposés à l'air [22, 79]. Ainsi, les baisses importantes de température sont évitées pendant la construction. Les seules exceptions concernent les surfaces amont et aval et des tractions élevées apparaissent dans ces zones compte tenu des effets de confinement externe et interne [48].

Other temperature control measures at Tamagawa Dam were as follows [5, 25, 26, 66, 78] :

- Moderate heat Portland cement with fly ash was used (30 % of the cement was replaced by fly ash).
- Unit content of cementitious materials (cement and fly ash) was restricted to 130 kg/m³ (219 lb/yd³).
- The lift thickness was restricted to 0.75 m (30 in) at the lower part of the dam and 1 m (39 in) at the upper part of the dam.
- The placement interval of RCD was restricted as shown in Table 4 depending on the seasons and the elevations. The average temperature at the site was 3 °C (37 °F) in the winter season and 23 °C (73 °F) in the summer season.
- The surface of RCD was cooled to reduce the temperature rise in the RCD in the summer seasons, and the placing rate of RCD was maintained.
- Fog spraying was employed just after RCD placement, and sprinklers followed. The water was cooled to 15 °C (59 °F).
- Mixing water was precooled to 4 °C (39 °F) in the summer season to decrease the placement temperature of RCD.
- The surface of RCD exposed to the air for a long time was insulated to prevent a rapid temperature drop in RCD. Insulation was employed when the RCD placement was interrupted in the winter or when the installation of outlet works prevented RCD from being placed.

Table 4. — Placement interval of RCD

Maximum allowable temperature	Date	Placement interval (days)	
		Minimum	Maximum
30 °C (80 °F)	4/1 - 5/31	2	—
	6/1 - 6/30	3	—
	7/1 - 9/10	4	14
	9/11 - 9/30	3	10
	10/1 - 11/30	3	10
35 °C (95 °F)	4/1 - 6/30	2	—
	7/1 - 8/31	3	14
	9/1 - 11/30	2	10

4.1.6. Contraction joints

The advantage of RCD dam construction in preventing temperature cracks is that RCD is placed constantly and that no transverse joints are exposed to the air for a long time [22, 79]. Therefore, no large temperature drop is produced during construction. The only exceptions are the upstream and downstream surfaces, and high tensile stresses are produced there by the external and internal restraints [48].

Pour cette raison, les joints transversaux de contraction (retrait) deviennent indispensables. Le béton traditionnel de parement, nécessaire pour augmenter la pérennité et l'étanchéité, s'échauffe plus que le béton RCD interne. La baisse de température peut alors entraîner une fissuration thermique du béton traditionnel externe. La nécessité des joints de contraction transversaux est confirmée par l'ouverture de ces joints sur les barrages RCD achevés [47]. Sans ces joints, il y aurait eu fissuration du béton, accompagnée de fuites.

La réduction de la durée d'exposition à l'air des surfaces des levées peut permettre l'élimination des joints de contraction longitudinaux. Cela a été prouvé, non seulement par des calculs sur ordinateur, mais également par des mesures effectuées sur des barrages RCD achevés [25].

Les joints de contraction transversaux sont obtenus à l'aide de lames fixées sur un engin spécial de découpage des joints [26, 67, 69, 70, 78]. Des plaques introduites dans les joints évitent leur refermeture [69, 70]. Ces procédés sont simples et ne gênent pas les autres activités du chantier. Un joint de contraction transversal est prévu tous les 15 m et est équipé d'un waterstop [69, 70].

4.1.7. Joints de reprise

Les joints de reprise sont des plans potentiels de faiblesse dans les barrages RCD. Cependant, ces joints sont inévitables puisque la mise en place en continu du béton RCD [31, 34] :

- nécessite des installations de chantier très importantes qui ne sont pas en général économiques,
- empêche la diffusion de la chaleur d'hydratation du ciment à travers la surface de la levée, avec pour résultat une très forte augmentation de la température du béton.

Le traitement des joints de reprise vise à garantir la résistance au cisaillement et l'étanchéité sur ces joints [5, 34, 38, 47, 78]. Des engins balayeurs auto-moteurs sont efficaces lorsque le béton est frais, compte tenu de la largeur de la zone de travail sur un barrage RCD en construction. Un jet d'air et d'eau sous une pression de 2 MPa est utilisé pour le nettoyage et la finition de la surface de la levée [69, 70]. Une couche de mortier de 15 mm d'épaisseur est appliquée sur le joint de reprise avant la mise en place du béton RCD [69, 70]. Des chargeurs sur pneus peuvent être utilisés. La composition du mortier est précisée dans le Tableau 5 [78].

On peut réduire le nombre de joints de reprise en augmentant l'épaisseur des levées [5]. Des études approfondies sur la composition du béton, la maîtrise des températures et les techniques de construction ont permis d'augmenter l'épaisseur des levées du béton RCD jusqu'à 1 m au barrage Tamagawa [5, 58, 66].

Tableau 5. — Composition du mortier

E/C + V (%)	V/C + V (%)	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Granulats fins (kg/m ³)
57	30	270	470	1 391

E = eau, C = ciment, V = cendres volantes.

Transverse contraction joints are, therefore, indispensable. Exterior conventional concrete, which is necessary to increase the durability and watertightness, has a higher temperature rise than interior RCD. The resulting temperature drop may produce temperature cracks in exterior conventional concrete. The need for transverse contraction joints is confirmed by the opening of these joints at the completed RCD dams [47]. Elimination of these joints would have resulted in cracks, accompanied by water leakage.

The shortest exposure of the lift surface can allow longitudinal contraction joints to be eliminated. This has been proved not only by computer analysis but also by measurements at completed RCD dams [25].

Transverse contraction joints are installed by blades attached to joint-cutting machines [26, 67, 69, 70, 78]. Plates are inserted into the joints to prevent them from reclosing [69, 70]. These procedures are simple and offer no obstacles to other construction works. Transverse contraction joints are installed every 15 m (49 ft), and waterstops are installed in these joints [69, 70].

4.1.7. Lift joints

Lift joints are potentially weak planes in the RCD dams. Nevertheless, lift joints are inevitable because [31, 34] :

- Continuous placement of RCD requires extremely large facilities which are usually not economical.
- Continuous placement of RCD prevents the diffusion of the hydration heat of cement from the lift surface, which produces a high temperature rise in RCD.

Lift joints should be treated so that the shear strength and watertightness along the lift joints are not affected [5, 34, 38, 47, 78]. Motor sweepers are efficiently used in green cutting because of the wide working area in the RCD dam construction. Air and water jetting of 2 MPa (284 lb/in²) pressure is used in cleaning and finishing the lift surface [69, 70]. A 15 mm (0.6 in) thickness of mortar is spread on the lift joints before RCD is placed [69, 70]. Wheel loaders can be used in the procedure. The mix proportion of mortar is shown in Table 5 [78].

The number of lift joints can be decreased with the lift thickness increased [5]. After comprehensive studies on RCD mixture, temperature control, and construction technologies, the lift thickness of RCD has been increased to 1 m (39 in) at Tamagawa Dam [5, 58, 66].

Table 5. — Mix proportion of mortar

W/C + F (%)	F/C + F (%)	Water kg/m ³ (lb/yd ³)	Cement kg/m ³ (lb/yd ³)	Fine aggregate kg/m ³ (lb/yd ³)
57	30	270 (455)	470 (792)	1 391 (2 345)

W = Water, C = Cement, F = Fly Ash.

4.1.8. Galeries et tunnels d'accès

La construction des barrages RCD peut être améliorée si les galeries, tunnels d'accès, etc. sont supprimés dans le corps du barrage. Cependant, des galeries de visite seront incorporées dans le corps du barrage pour la surveillance de la sécurité du barrage (Fig. 14). La qualité de la construction sera maintenue en arrangeant leur disposition ou en simplifiant leur construction [39].

4.1.9. Maîtrise des percolations

Les barrages RCD seront conçus selon la même doctrine que les barrages en béton traditionnel [30, 39] et l'étanchéité sera la même dans les deux cas. Pour assurer l'étanchéité, on adopte du béton traditionnel en parement et on effectue un traitement des joints de reprise. Le béton RCD lui-même aura une étanchéité suffisante [47, 78]. Cette étanchéité a été confirmée par des essais d'eau dans des forages pratiqués dans le béton des barrages RCD Shimajigawa et Tamagawa [39, 67]. L'absence de poches ou d'alvéoles d'air a été constatée dans les carottes. Aucun drain n'est installé dans le béton RCD, compte tenu de son excellente étanchéité.

Des galeries de visite sont nécessaires pour surveiller les fuites dans la fondation rocheuse et pour confirmer la stabilité de cette fondation [30].

4.1.10. Appareils d'auscultation

Des appareils d'auscultation sont noyés dans les barrages RCD pour confirmer la sécurité du barrage et pour rassembler des informations utiles pour l'étude des barrages RCD futurs. Un minimum d'auscultation capable de confirmer la sécurité du barrage est nécessaire dans les barrages RCD. Les préoccupations essentielles portent sur les températures et les contraintes thermiques.

4.1.11. Fondations

Le traitement des fondations des barrages RCD reste fondamentalement identique à celui des fondations des barrages en béton traditionnel. Le traitement minimal comporte des injections de consolidation, un rideau d'étanchéité et des drains dans la fondation rocheuse.

La distance entre le parement amont et les galeries à partir desquelles les drains sont forés sera étudiée afin de ne pas gêner la mise en place du béton RCD. Les injections de consolidation gênent la mise en place du béton. Il est préférable de faire ces injections avant la mise en place du béton, si le rocher de fondation peut encaisser la pression d'injection sans résurgence du coulis. Dans le cas contraire, le poids du béton RCD déjà placé peut permettre les injections sous pression, sans perte de coulis [64]. La disposition des forages d'injection sera étudiée pour ne pas gêner le bétonnage.

Un béton de propreté traditionnel permet d'obtenir une surface horizontale facilitant le passage des engins (camions à benne basculante, etc.). En outre, ce béton traditionnel améliore la liaison entre le barrage et la fondation rocheuse.

4.1.12. Évacuateurs de crue

Les évacuateurs de crue des barrages RCD et ceux des barrages en béton traditionnel ne présentent pas de différence. Un béton traditionnel, riche en ciment,

4.1.8. Galleries and adits

Efficient RCD dam construction may be achieved if galleries, adits, and other structures in the dam body are eliminated. Nevertheless, inspection galleries should be installed in the dam body in order to monitor the dam safety (Fig. 14). Efficient RCD dam construction should be achieved by arranging their layout or by simplifying their construction [39].

4.1.9. Seepage control

RCD dams should be designed using the same philosophy as conventional concrete dams [30, 39], and they should have the same watertightness as conventional concrete dams. The placement of exterior conventional concrete and the treatment of lift joints are employed to ensure watertightness. RCD itself should also have enough watertightness [47, 78]. The watertightness of RCD was confirmed by water pressure tests for drilling holes in the RCD at Shimajigawa Dam and at Tamagawa Dam [39, 67]. No air pockets or honeycomb were observed in the drilled cores. No drains are installed in RCD itself because of the splendid watertightness of RCD.

Inspection galleries are necessary to monitor the seepage through the bedrock and to confirm the stability of the bedrock [30].

4.1.10. Instrumentation

The instruments are embedded in RCD dams to confirm the safety of RCD dams and to collect data useful in future design of RCD dams. The minimum instrumentation for confirming the dam safety is necessary in RCD dams. The temperature and temperature stress are the main concerns in RCD dams.

4.1.11. Foundation

Foundation treatments for RCD dams are basically the same as for conventional concrete dams. Consolidation grouting, curtain grouting, and drainage in the bedrock are the minimum requirements for foundation treatments.

The spacing between the upstream face and the galleries from which the drains are drilled should be studied in order to maintain the efficient placement of RCD. Consolidation grouting is an obstacle in RCD placement. Consolidation grouting had better be employed before RCD placement if the foundation rock allows the pressure of grouting to be applied without leakage of grout. Otherwise, the overburden of the placed RCD can be utilized to apply the pressure of grouting without leakage of grout [64]. The layout of the grout holes should be studied in maintaining the efficient placement of RCD.

Conventional concrete is placed for bedding concrete to provide a horizontal surface which makes the travelling of dump trucks and other machinery possible. Conventional concrete can also provide good bond between the dam and the bedrock.

4.1.12. Spillways

There are no differences in the design of spillways between RCD dams and conventional concrete dams. Conventional rich concrete is necessary at the crest and

est nécessaire sur la crête et la doucine des évacuateurs pour assurer la pérennité et la résistance à la cavitation. Ce béton classique est également nécessaire pour profiler la surface lisse.

4.1.13. Ouvrages de vidange et de restitution

La présence d'ouvrages de vidange et de restitution dans les barrages RCD peut gêner le bon déroulement du chantier en mettant un obstacle au passage des engins. La disposition et le profil de ces ouvrages seront étudiés soigneusement pour ne pas nuire au rythme de construction [27].

Une solution à ce problème consiste à placer les ouvrages de vidange et de restitution le long des appuis du barrage. Une autre solution consiste à projeter des conduits qui ne soient pas horizontaux, pour laisser toujours le passage aux engins sur la surface des levées. Au barrage Tamagawa, un pont provisoire a été construit par-dessus les ouvrages de vidange et de restitution pour permettre le passage des camions à benne basculante [78].

4.2. MATÉRIAUX ET DOSAGES

4.2.1. Généralités

Le béton RCD, compacté au rouleau vibrant, a une consistance très sèche. Si ce béton est trop sec, il sera difficile d'assurer un compactage suffisant, notamment à la partie inférieure de la levée; par contre, si la teneur en eau est excessive, les rouleaux vibrants ne peuvent pas évoluer sur la levée. Pour cette raison, il est très important de choisir un dosage adapté au compactage au rouleau. Le Tableau 6 donne un exemple de composition d'un béton traditionnel et d'un béton RCD.

Les caractéristiques nécessaires du béton RCD sont les suivantes :

- La consistance du béton RCD doit permettre l'évolution des rouleaux vibrants, tout en assurant un bon compactage.
- La teneur en liant sera aussi faible que possible, afin de réduire la chaleur d'hydratation et d'éviter la fissuration thermique, tout en assurant les caractéristiques nécessaires de résistance, de pérennité et d'étanchéité.
- Une partie du ciment sera remplacée par des cendres volantes afin de réduire la chaleur d'hydratation et d'augmenter la consistance du béton RCD.
- La valeur du rapport sable/granulats du béton RCD est supérieure à celle du béton traditionnel, afin d'éviter la ségrégation lors du déversement des camions à benne basculante et de faciliter le compactage par les rouleaux vibrants.

the chute sections of spillways to ensure durability and resistance to cavitation. Conventional concrete is also necessary in order to shape the smooth surface.

4.1.13. Outlet works

Outlet works in RCD dams may pose obstacles to the efficient RCD dam construction and may prevent dump trucks from crossing over them. The layout and profile of the outlet works should be carefully studied for the efficient RCD dam construction [27].

Installation of the outlet works along the abutments of the dam is one solution. Another solution is that the profile of the outlet works is so designed that they are not horizontally installed, thereby providing a route for dump trucks at any lift surfaces of the dam. At Tamagawa Dam, a temporary overbridge was built over the outlet works to provide the pass for dump trucks [78].

4.2. MATERIALS AND MIXTURE PROPORTIONING

4.2.1. General

RCD is of extremely dry consistency which is compacted by vibratory rollers. If RCD is excessively dry, effective consolidation will be difficult, especially at the bottom of the lift, and if RCD is too wet, the vibratory rollers cannot run on it. It is, therefore, of particular importance in the RCD method to select mixture proportions suitable to roller compaction. Table 6 shows an example of the conventional concrete mix and RCD mix.

RCD should meet the following requirements :

- RCD should have consistency to make travelling of vibratory rollers on RCD possible and at the same time to allow compaction of RCD by vibratory rollers.
- Unit content of cementitious materials should be as low as possible to reduce heat of hydration and to prevent temperature cracking, while maintaining the required strength, durability, and watertightness.
- A certain part of cement should be replaced by fly ash in order to reduce heat of hydration and to increase consistency of RCD.
- A sand-aggregate ratio of RCD should be higher than that of conventional concrete in order to prevent segregation when unloading from dump trucks and to facilitate compaction by vibratory rollers.

Tableau 6. — Exemple de composition de bétons

	Béton traditionnel	Béton RCD
Dimension maximale des gros granulats - mm	150	150
Affaissement (slump) - cm	4 ± 1	0
Indice de compactage par vibration (CV) - secondes	—	20 ± 10
Rapport eau/ciment (cendres volantes comprises) - %	68	73
Rapport sable/granulats - %	25	30
Dosages :		
• eau - kg/m ³	115	95
• ciment + cendres volantes - kg/m ³	170	130
• granulats fins - kg/m ³	523	657
• gros granulats - kg/m ³	1 570	1 544

4.2.2. Consistance

4.2.2.1. Dosage en eau

Le dosage optimal en eau du béton RCD est influencé par le type et par la quantité de liant, et par la granulométrie et la forme des granulats. Le dosage en eau sera choisi pour assurer une consistance adaptée au compactage par rouleau.

La méthode de détermination du dosage en eau est la suivante :

- Essais de laboratoire pour choisir le dosage en eau.
- Planches d'essais avec les rouleaux prévus pour le chantier, pour vérifier le dosage en eau déterminé par les essais en laboratoire.
- Modifications éventuelles.

Le dosage en eau du béton RCD est inférieur d'environ 10 % de celui d'un béton classique.

4.2.3. Matériaux constituants

4.2.3.1. Ciment et pouzzolanes

Tous les ciments utilisés pour la fabrication des bétons traditionnels conviennent au béton RCD, mais un mélange (par exemple, ciment Portland à chaleur d'hydratation modérée, mélangé avec des cendres volantes) est souhaitable pour réduire l'augmentation de la température du béton.

Généralement, une partie du ciment du béton RCD est remplacé par des pouzzolanes, telles que des cendres volantes. Le plus souvent, la teneur en cendres volantes correspond à environ 30 % de la teneur totale en ciment et en cendres volantes. Parfois, on augmente la quantité de cendres volantes pour améliorer les caractéristiques du béton RCD frais. Cependant, il faut noter que l'augmentation, dans le temps, de la résistance du béton RCD à forte teneur en cendres volantes est lente.

Table 6. — Example of Mixture Design

	Conventional concrete	RCD
Maximum size of coarse aggregate - mm (in) ..	150 (6)	150 (6)
Slump - cm (in)	4 ± 1 (1.6 ± 0.4)	0
Vibrating compaction (VC) value - seconds	—	20 ± 10
Water/cement ratio (including fly ash) - %	68	73
Sand/aggregate ratio - %	25	30
Unit content :		
• Water - kg/m ³ (lb/yd ³)	115 (194)	95 (160)
• Cement and fly ash - kg/m ³ (lb/yd ³)	170 (287)	130 (219)
• Fine aggregate - kg/m ³ (lb/yd ³)	523 (882)	657 (1 107)
• Coarse aggregate - kg/m ³ (lb/yd ³)	1 570 (2 646)	1 544 (2 603)

4.2.2. Consistency

4.2.2.1. Water content

The optimum water content of RCD is influenced by the type and the amount of cementitious materials and the grading and particle shape of the aggregates. Water content should be so determined that it can provide suitable consistency for roller compaction.

The procedure to determine water content is (1) performing laboratory tests to select the water content, (2) carrying out test fills using the actual vibratory rollers to check the water content determined by laboratory tests, and (3) making modifications if necessary.

The water content in RCD is about 10 % smaller than in conventional concrete.

4.2.3. Materials

4.2.3.1. Cement and pozzolan

Any cement for conventional concrete may be used, but a blended cement (for example, moderate heat Portland cement with fly ash) is desirable to hold the temperature rise of concrete to a minimum.

Cement in RCD is generally replaced by pozzolans such as fly ash. The content of fly ash is generally about 30 % of the sum of cement and fly ash. There may be a case of more fly ash added to improve the properties of fresh RCD. It is, however, noted that the strength development of RCD with high fly ash content is slow.

4.2.3.2. *Adjuvants*

Le béton RCD est utilisé comme béton interne et ainsi ne présente pas de problème de pérennité. Néanmoins, on peut utiliser des adjuvants (entraîneurs d'air, réducteurs d'eau) pour en améliorer la maniabilité.

4.2.3.3. *Granulats*

Les granulats utilisés dans le béton RCD n'ont pas besoin d'être d'une très grande qualité, mais il faut tenir compte de la forme et de la granulométrie des éléments pour obtenir la consistance et les caractéristiques de compactage voulues.

Les granulats peuvent être un matériau de carrière concassé, ou des granulats roulés. Un programme détaillé de reconnaissances et d'essais est nécessaire pour s'assurer de leur qualité et de leur quantité.

Les granulats fins ne doivent pas contenir de matières organiques et doivent présenter une granulométrie acceptable. Une granulométrie uniforme est souhaitable. Pour améliorer les caractéristiques du béton RCD frais, on augmente la quantité des fines $\leq 0,15$ mm ou $\leq 0,075$ mm (tamis n° 200).

Le béton RCD est un mélange très sec et, pour cette raison, il est très sensible à la moindre variation de teneur en eau. Aussi, il importe de contrôler soigneusement la teneur en eau des granulats fins.

Les gros granulats doivent être propres, sans matière organique, et leurs granulométrie et dimension maximale doivent être adaptées au compactage par rouleau.

Comme le béton RCD a une consistance très sèche, il y a risque de ségrégation pendant l'épandage : aux barrages Shimajigawa et Ohkawa [14], la dimension maximale des gros granulats a été limitée à 80 mm afin d'éviter la ségrégation. Cependant, au barrage Tamagawa, cette valeur est passée à 150 mm. Les gros granulats étaient stockés en quatre catégories (5 à 20 mm, 20 à 40 mm, 40 à 80 mm, 80 à 150 mm).

4.2.4. **Méthode de dosage du béton RCD**

4.2.4.1. *Généralités*

Le béton RCD est un mélange très sec, permettant le compactage au rouleau vibrant. Compte tenu de la faible teneur en eau, le dosage en ciment peut être réduit pour obtenir la résistance requise. Cependant, une faible quantité de particules fines (ciment, etc.) favorise la ségrégation et nuit au bon compactage. Pour éviter ces problèmes, il convient de remplir les vides entre les granulats fins et entre les gros granulats avec une quantité suffisante de pâte de ciment et de mortier, respectivement. Une pouzzolane (par exemple, cendres volantes), de faible poids spécifique par rapport à celui du ciment, peut effectivement remplir les vides entre les granulats fins, avec un faible dosage en liant. Au barrage Tamagawa, le dosage en liant était de 130 kg/m^3 , dont 30 % étaient constitués de cendres volantes.

Le béton des zones externes est difficile à compacter avec des rouleaux vibrants : un béton traditionnel est alors utilisé pour ces zones.

4.2.3.2. *Admixtures*

RCD is used as interior concrete and does not have the problem of durability, but air-containing or water-reducing admixtures can be used to improve workability of RCD.

4.2.3.3. *Aggregates*

The aggregates of RCD do not require especially good quality, but consideration must be given to the particle shape and grading in order to ensure the consistency of RCD and ease of compaction.

Either crushed aggregate from quarries or riverbed gravel is available in RCD. Detailed surveys and testing are necessary with regard to their quality and quantity.

Fine aggregates should not contain organic impurities and be of suitable grading. It is desirable for the grading to be consistent. For better properties of fresh RCD, fines of 0.15 mm and under or 0.075 mm (200 sieve) and under should be increased.

RCD mixture is of extremely dry consistency and is, therefore, sensitive to the slightest change in water content. Accordingly, moisture content control for the fine aggregates is important.

Coarse aggregates should be clean and not contain organic impurities, and be of maximum size and grading suitable to roller compaction.

Because of extremely dry consistency, RCD has a tendency of segregation when spreading. The maximum size of coarse aggregate was restricted to 80 mm (3 in) in consideration of preventing segregation at Shimajigawa Dam and Ohkawa Dam [14]. However, a maximum size of coarse aggregate was increased to 150 mm (6 in) at Tamagawa Dam. The coarse aggregate was piled into four gradings (5-20 mm, 20-40 mm, 40-80 mm, and 80-150 mm).

4.2.4. **Procedure for mixture proportioning of RCD**

4.2.4.1. *General*

RCD has mixture proportions of extremely dry consistency to be well compacted by vibratory rollers. Because of low water content, cement content can be lower to obtain the required strength. However, small amounts of fines such as cement tend to cause segregation of materials and insufficient compaction. In order to prevent segregation and attain good compaction, the voids of both fine and coarse aggregates should be filled with adequate amounts of cement paste and mortar, respectively. The use of pozzolan (such as fly ash) which has low specific gravity compared with cement is effective for filling the voids of fine aggregates with small quantities of cementitious materials. At Tamagawa Dam, 130 kg/m³ (219 lb/yd³) of cementitious materials were used, 30 % of which was replaced by fly ash.

Exterior concrete is difficult to compact with vibratory rollers, and conventional concrete is used.

Le diagramme de l'étude suivie pour déterminer la composition du béton RCD est représenté dans la Fig. 15 [65].

4.2.4.2. Consistance

Les rouleaux vibrants ne peuvent pas évoluer sur le béton frais, même à affaissement (slump) faible. Par contre, un béton trop sec est difficile à compacter, et risque d'être défectueux (résistance mécanique, pérennité, tenue globale). Il est donc essentiel de choisir la bonne consistance du béton RCD.

Cette consistance est déterminée à l'aide d'un appareil vibrant (Photo 3). Cet appareil dérive de l'appareil Vebe, avec certaines modifications :

- la fréquence de vibration est d'environ 50 Hz;
- il n'y a pas de cône;
- le compactage est accéléré par application d'une surcharge de 20 kg.

Cet essai mesure le temps de vibration nécessaire à l'apparition du ressuage de la pâte de ciment sur toute la surface du béton RCD contenu dans le récipient, cette pâte se collant alors sur un disque en matière plastique transparente, posé à sa surface. Le temps ainsi mesuré est pris comme un indice de consistance. Afin de distinguer cette valeur des résultats d'essais analogues (essai Vebe, ...), on l'appelle indice de « Compactage par Vibration » CV (VC en anglais). Il est généralement admis qu'une valeur CV de 10 à 30 secondes permet un compactage satisfaisant sur le chantier [32, 38]. Les rouleaux vibrants risquent de trop s'enfoncer dans un béton RCD d'une valeur CV inférieure à 10. Pour une valeur supérieure à 60, la consolidation est difficile.

Lors de la détermination de la consistance, il est souhaitable d'effectuer des essais CV sur des échantillons avec granulats en vraie grandeur et, en même temps, de procéder à la réalisation d'une planche d'essai. La valeur CV optimale est déterminée en tenant compte des résultats obtenus dans les deux types d'essais.

La Fig. 16 donne un exemple de relation entre le dosage en eau d'un béton RCD et la valeur CV obtenue à l'aide de deux types d'appareils de mesure de la consistance, standard et grande taille [32].

4.2.4.3. Dosage en eau

Pour obtenir la consistance voulue, le dosage en eau du béton RCD est déterminé à partir des 3 essais de laboratoire suivants :

- masse volumique du mortier;
- résistance à la compression;
- valeur CV,

pour différents dosages en eau.

Le dosage en eau étant le paramètre primordial, il est souhaitable de confirmer la valeur choisie sur une planche d'essais, avec compactage par rouleaux vibrants.

Des exemples de résultats d'essais : masse volumique, résistance à la compression, en fonction de différents dosages en eau, sont présentés respectivement dans les Fig. 17 et 18 [78].

The flow of mixture proportioning of RCD is as shown in Fig. 15 [65].

4.2.4.2. *Consistency*

Vibratory rollers cannot be operated on the fresh concrete, even with slight slump. On the other hand, excessively dry concrete is difficult to consolidate which causes inadequate strength, durability, or overall integrity. Therefore, it is extremely important to select the proper consistency of RCD.

Consistency of RCD is determined using a vibrating consistency meter (Photo 3); the idea of this testing device came from the Vebe apparatus, and some modifications have been provided such as (1) the frequency of vibration is about 50 Hz, (2) a cone is not used, and (3) compaction is accelerated by application of a surcharge of 20 kg (44 lb). The test is to measure the time in seconds until the vibration causes cement paste to bleed over the entire surface of RCD in the container and adhere to a transparent plastic disk on its surface. This time is used as an index of consistency. In order to distinguish this value from the results by other similar tests such as the Vebe test, it is called Vibrating Compaction (VC) value. It is generally acknowledged that a VC value of 10 to 30 seconds gives satisfactory compaction in the field [32, 38]. Vibratory rollers may subside excessively on an RCD mixture with a VC value less than 10. A VC value over 60 is difficult to consolidate.

In determining consistency, it is advisable to carry out VC tests with full-sized aggregate, along with the execution of the test fill. The optimum VC value should be determined by the results of both the laboratory and field tests.

Fig. 16 shows an example of the relationship between water content of RCD mixture and VC value for large and standard VC consistency meters, respectively [32].

4.2.4.3. *Water content*

Water content of RCD mixture should be determined by performing the following three laboratory tests so that it will provide the required consistency : (1) unit weight of mortar, (2) compressive strength, and (3) VC value of RCD mixture with various water content. Since the water content is the most important factor, it is desirable to be reconfirmed at the test fill using vibratory rollers.

Examples of unit weight tests of mortar and compressive strength tests with various water content are shown in Fig. 17 et 18 respectively [78].

4.2.4.4. *Dosage en liant*

Le dosage en ciment du béton RCD est plus faible que celui d'un béton traditionnel. Il est important d'étudier le dosage à prévoir, du point de vue de la compactibilité et de la résistance mécanique. S'il est nécessaire d'augmenter la fraction fine, on peut ajouter des pouzzolanes (cendres volantes, ...).

La résistance à la compression est vérifiée sur des éprouvettes cylindriques standards et des carottes prélevées dans les planches d'essai. Un exemple de relation entre le dosage en liant et la résistance à la compression est présenté dans la Fig. 19 [38, 78].

4.2.4.5. *Rapport sable/granulats*

Le rapport sable/granulats est un paramètre important dans l'étude de la composition du béton RCD, pour obtenir une consistance satisfaisante. La première phase de la détermination de ce rapport consiste à choisir la granulométrie des gros granulats assurant la masse volumique maximale. Pour cela, on utilise l'appareil de mesure de consistance CV. On détermine la quantité de chaque fraction (5 à 20 mm, 20 à 40 mm, 40 à 80 mm, etc.), afin de maximiser la masse volumique des gros granulats. Par la suite, on procède à une série d'essais CV en faisant varier le rapport sable/granulats, le dosage en liant et le dosage en eau étant maintenus constants. On établit ainsi le rapport optimal sable/granulats qui donne la valeur CV la plus faible. Il est utile de vérifier sur la planche d'essai la composition du béton RCD ainsi déterminée.

Le graphique de la Fig. 20 donne un exemple des résultats des essais CV en fonction du rapport sable/granulats [38].

4.2.4.6. *Planches d'essais*

Ayant défini la composition du béton RCD à partir des essais de laboratoire, il est utile d'étudier la maniabilité et la résistance mécanique du béton sur des planches d'essais, pour vérifier la composition choisie.

Les paramètres à étudier sur la planche d'essai peuvent être classés en trois catégories : vérification de la composition choisie; vérification des spécifications d'épandage et de compactage; formation des divers ouvriers :

- vérification de la composition du béton;
- mise au point des détails de compactage;
- formation aux travaux d'épandage;
- formation à la réalisation des joints;
- formation au découpage du béton frais mis en place.

4.3. **CONSIDÉRATIONS SUR LA CONSTRUCTION**

4.3.1. **Généralités**

Compte tenu des faibles dosages en eau et en ciment du béton RCD, les considérations suivantes sont à prendre en compte dans la construction des barrages RCD :

4.2.4.4. *Content of cementitious materials*

Cement content of RCD mixture is less than that of conventional concrete. It is important to study the cement content from the standpoint of compactibility as well as strength of RCD. If it is necessary to supplement fines, pozzolans such as fly ash can be added.

The compressive strength should be confirmed by both the standard cylinder specimen and the drilled cores obtained from the test fills. An example of the relation between cementitious material content and compressive strength is shown in Fig. 19 [38, 78].

4.2.4.5. *Sand-aggregate ratio*

The sand-aggregate ratio is of importance to determine the mix proportion of RCD with suitable consistency. The first step to determine the sand-aggregate ratio is to find the grading of coarse aggregates which provides the maximum unit weight. VC consistency meters are used in this procedure. The proportion of each grading of coarse aggregates (5-20, 20-40, 40-80 mm, etc.) in RCD is determined so that it can provide the maximum unit weight of coarse aggregates. VC consistency tests are then employed for the several RCD mixtures with various sand-aggregate ratios, while unit cementitious material content and unit water content in RCD mixture are kept constant. The optimum sand-aggregate ratio which has the lowest VC value is determined. The mix proportion of RCD thus determined had better be reconfirmed in the test fill.

Fig. 20 shows an example of test results for VC value versus the sand-aggregate ratio [38].

4.2.4.6. *Test fill*

After selection of the specified mix proportion of RCD through laboratory tests, the workability and strength of the mix had better be examined through test fills, upon which the final confirmation of mix proportions is made.

The items for study in the test fill can be classified into three categories. Those are reconfirmation of mix proportion of RCD, confirmation of the spreading and compacting specifications, and training of the operators for various construction skills :

- reconfirmation of the mix proportion;
- confirming compaction details;
- training of spreading skills;
- training of joint construction skills;
- training of green cutting skills.

4.3. CONSTRUCTION CONSIDERATIONS

4.3.1. General

Because of the dry and lean mix of RCD, the following considerations are necessary in RCD dam construction :

- Le béton RCD sera bien malaxé, pour obtenir un produit homogène.
- La ségrégation du béton RCD sera maîtrisée pendant le transport depuis la centrale jusqu'à la zone de mise en place. Il est préférable de déverser le béton en petits tas, pour éviter la ségrégation.
- Le tas de béton RCD sera étalé par bulldozer en une couche uniforme sans ségrégation.
- Le compactage du béton RCD par les rouleaux vibrants sera soigneusement contrôlé.

4.3.2. Organisation de la construction

4.3.2.1. Programme de bétonnage [29]

Bien qu'une centrale à béton de grande capacité permette la mise en place du béton RCD en levées plus épaisses et plus larges, la capacité optimale doit être fixée en tenant compte des caractéristiques du barrage (par exemple : volume et surface des sections horizontales du barrage, disposition générale des ouvrages d'évacuation et des galeries dans le corps du barrage). Si la surface de la section horizontale du barrage est trop grande pour permettre la mise en place du béton RCD en une seule couche, cette surface peut être divisée en plusieurs plots [78].

L'épaisseur normale des levées du béton RCD est de 0,5 à 1,0 m, avec un intervalle de temps de 3 à 4 jours entre levées successives [67].

Cet intervalle de temps peut être modifié selon la saison. Au cours des étés chauds, le bétonnage peut être interdit le jour. Au cours des hivers froids, compte tenu du retard de prise, on peut retarder le décoffrage et le découpage du béton frais.

4.3.2.2. Capacité des installations et matériels de chantier

Le choix des installations et matériels de chantier d'un barrage RCD peut s'inspirer des chantiers de barrages en béton traditionnel, mais les points particuliers suivants sont à considérer [26] :

- Sur un chantier de barrage RCD, le volume de béton mis en place par unité de temps est généralement beaucoup plus grand que pour un barrage en béton traditionnel, compte tenu de la vitesse de construction plus rapide.

- La capacité des installations et matériels de chantier sera choisie pour maintenir la plus grande productivité possible. A noter que la vitesse de mise en place du béton RCD est gênée au fond des vallées étroites, au couronnement et au niveau des ouvrages d'évacuation.

- Le matériel de transport doit être adapté à la topographie du site et au volume du barrage. Les blondins fixes, les plans inclinés, les camions à benne basculante et les tapis transporteurs conviennent bien aux chantiers de barrages RCD.

- Il faut tenir compte de l'emplacement des ouvrages d'évacuation et des galeries, car ils ont des effets sur le déroulement des travaux.

- La productivité dépend des dispositions prises en matière de matériels de chantier : camions à benne basculante, bulldozers, rouleaux vibrants, machines à découper les joints. Il faut étudier soigneusement le nombre d'engins nécessaire (Photo 4).

- RCD should be well mixed so that a homogeneous product can be obtained.
- Segregation of RCD should be controlled during the handling process from the mixing plant to the placement area. In the dumping operation to the placement area, smaller piles are preferable to avoid segregation of RCD.
- The pile of RCD should be spread by bulldozers into a uniform layer without segregation.
- Compaction of RCD by vibratory rollers should be well controlled.

4.3.2. Planning

4.3.2.1. Concrete placing schedule [29]

Although a mixing plant with larger capacity enables the placement of RCD with thicker and wider lifts, the optimum capacity of the mixing plant should be determined by taking account of the features of the dam, such as the volume and area of the horizontal sections of the dam and the layout of outlet works and galleries in the dam body. When the area of the horizontal section of the dam is too large to place the RCD in one layer, the area can be divided into several blocks [78].

The standard lift thickness of RCD is 0.5 to 1.0 m (20 to 39 in), and the standard placing interval is three to four days [67].

The placing interval may be changed according to the seasons. In hot summer, the placing during daytime may be prohibited. In cold winter, because of delay of setting time, removal of forms and green cutting may be delayed as well.

4.3.2.2. Capacity of construction plants

Although construction plants of RCD can be designed by referring to those of conventional concrete, the following are particular items of consideration [27] :

- In RCD dam construction, the volume of concrete placed at one time is generally much larger than in a conventional concrete dam because of the high speed of RCD construction.

- The capacity of construction plants should be designed so that the production of RCD is kept as high as possible. The construction speed in RCD placement is hampered at the narrow riverbed, at the dam crest, and at elevations where outlet works are installed in the dam.

- The optimum combination of hauling facilities or equipment should be selected taking into account the site topography and the dam volume. Fixed cableways, inclines, dump trucks, and conveyor belts can be used in RCD construction.

- The location of outlet works and galleries should be taken into consideration because they have a significant influence on efficient construction.

- Efficient RCD construction depends on the appropriate arrangement of construction machinery such as dump trucks, bulldozers, vibratory rollers, and joint-cutting machines. The number of machines should be well studied (Photo 4).

4.3.3. Méthodes de fabrication et de mise en place du béton RCD

4.3.3.1. Production des granulats

Les spécifications relatives aux granulats utilisés dans le béton RCD sont pour l'essentiel identiques à celles du béton traditionnel, sauf en ce qui concerne le rapport sable/granulats.

La vitesse de mise en place du béton, plus rapide que dans la construction en béton classique, nécessite des centrales à granulats de grande capacité. Les silos de stockage auront aussi une capacité appropriée. Les silos à granulats fins seront étudiés avec soin, puisque la teneur en eau adhérent à la surface des grains exerce une grande influence sur la qualité du béton.

4.3.3.2. Dosage et malaxage

Du fait des caractéristiques spécifiques du béton RCD (produit sec et pauvre en ciment), le malaxage sera surveillé avec beaucoup de soin pour obtenir un produit homogène. Compte tenu du faible dosage en ciment, l'adhérence du mortier sur la paroi interne de la bétonnière et sur les lames sera réduite. Il faut également éviter la ségrégation lorsque le béton est déchargé de la bétonnière.

Au barrage Ohkawa, on a utilisé avec succès quatre groupes de bétonnières basculantes, de 1,5 m³ chacune, pour obtenir un béton RCD homogène, de la qualité requise [34, 64, 65].

Au barrage Tamagawa, on a également adopté la bétonnière basculante, après modification de la forme des lames [26]. On a choisi ce type de bétonnière après examen du risque de ségrégation et de la facilité d'entretien des malaxeurs à débit contenu, pour un béton RCD de 150 mm de dimension maximale de granulat [78]. Ce type de bétonnière présente l'avantage de réduire le temps de malaxage et de réduire l'effet de ségrégation lors du déchargement, mais il a l'inconvénient d'une grande puissance consommée et d'une usure accélérée des lames.

Les bétonnières à débit continu comprennent le type « à tambour » et le type « malaxeur à argile ». Ce dernier a été utilisé avec succès aux chantiers des barrages Shimajigawa et Pirika [14, 36, 67].

4.3.3.3. Transport et épandage

a) Transport

Généralement, des reprises du béton RCD sont ménagées entre la centrale à béton et la zone de mise en place. Le nombre de reprises sera réduit, des trémies vibrantes étant prévues pour les stockages intermédiaires, car ce type de trémie évite la ségrégation.

Si l'on utilise des camions à benne basculante pour le transport depuis la centrale à béton jusqu'au chantier d'épandage, la pollution produite par les roues doit être nettoyée à l'eau.

Au barrage Shimajigawa, un ensemble comportant un blondin et des camions à benne basculante a été utilisé, tandis qu'au chantier Tamagawa, on adopta des plans inclinés et des camions [14, 27]. Au barrage Ohkawa, on a préféré des camions

4.3.3. RCD production and placing methods

4.3.3.1. Aggregate production

The requirements for aggregate used in RCD are basically the same as those of conventional concrete, except that the sand-aggregate ratio will usually vary from that of conventional concrete.

The rate of concrete placement is much higher in RCD dam construction than in conventional concrete dam construction, and aggregate plants of large capacity are required. The aggregate storage bins should also have an appropriate capacity. Storage bins for fine aggregate should be carefully designed because the surface moisture content of fine aggregate is especially important in controlling the quality of RCD.

4.3.3.2. Batching and mixing

RCD is such a dry and lean concrete that mixing should be well controlled to make a homogeneous product. Because of the low cement content of RCD, sticking of mortar to the inner face of the mixer and the blades should be minimized. Segregation of RCD should be also avoided when RCD is dumped from the mixer.

Ohkawa Dam successfully used four sets of tilting mixers [1.5 m³ (2 yd³)] and produced homogeneous RCD mixture with the required quality [34, 64, 65].

Tamagawa Dam also adopted tilting mixers with some reformation in the shape of the blades [26]. Tilting mixers were selected after comparing the tendency for segregation and the ease of maintenance with forced mixers in producing RCD with a maximum aggregate size of 150 mm (6 in) [78]. Forced mixers have the merit of a short mixing time and less segregation in dumping but have shortcomings of high power consumption and a high rate of exhaustion of blades.

The forced mixer includes a pan type and a pug-mill type. Pug-mill type mixers were successfully used in Shimajigawa Dam and Pirika Dam [14, 36, 67].

4.3.3.3. Transporting and spreading

a) Transporting

RCD is usually subject to reloading on the way from the mixing plant to the placement area. The number of rehandlings should be minimized, and surging hoppers should be used at rehandling points to prevent the segregation of RCD.

When dump trucks are used for RCD transportation from the mixing plant to the placing area, contamination of the wheels should be cleaned by water.

In Shimajigawa Dam, a combination of a cableway and dump trucks was used, while in Tamagawa Dam, inclines and dump trucks were used [14, 27]. In Ohkawa Dam, only dump trucks were used [38] because the topographic condition allowed

seuls [38], les conditions topographiques permettant leur passage sur l'ensemble du trajet; on a pu ainsi accélérer la vitesse de construction.

b) Épandage

Le béton RCD est épandu en couches d'épaisseur appropriée, sans ségrégation. Le déversement du béton des camions, des tapis transporteurs ou des bennes (blondin) est fait avec précautions, pour éviter la ségrégation autant que possible. Le béton est ensuite régalié en couches uniformes, sans ségrégation, en plusieurs passes, par des bulldozers (Photo 4).

Au barrage Shimajigawa [14, 67], le béton RCD était épandu en trois ou quatre couches minces de 0,15 à 0,20 m d'épaisseur, au bulldozer, et compacté par levée à l'aide de rouleaux vibrants. L'épandage en couches minces a donné des résultats satisfaisants. Les couches minces présentent l'avantage d'être partiellement compactées par le passage du bulldozer.

Au barrage Tamagawa [78], le béton RCD était épandu en couches minces de 0,25 m d'épaisseur, sans ségrégation, malgré l'utilisation d'un granulat de 150 mm de dimension maximale.

4.3.3.4. Compactage

Les rouleaux vibrants utilisés dans la construction des barrages RCD sont du type automoteur (Photo 5). Le mécanisme du compactage du béton par rouleau vibrant est supposé associer deux actions : l'effet du poids du rouleau et le fluage du mortier provoqué par les vibrations.

Le nombre nécessaire de passes des rouleaux vibrants peut être jugé d'après le tassement produit à la surface du béton et le ressuage de la pâte. Généralement, il y a deux passes sans vibrations, suivie de six avec vibrations, pour une épaisseur de levée de 0,5 m, et deux passes sans vibrations, suivies de douze avec vibrations, pour une épaisseur de levée de 0,7 m [38]. Il convient d'éviter les désordres à la surface du béton, dus aux démarrages ou aux changements de direction des engins.

Lors du compactage, la bande achevée sera soumise à une vibration avec la nouvelle bande grâce à un chevauchement de 0,2 à 0,5 m.

La compactibilité est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, ainsi que par la composition du béton RCD. La meilleure composition sera déterminée après essais sur place. La vitesse de déplacement des rouleaux vibrants est normalement de 1 km/h.

4.3.3.5. Traitement des joints de reprise

Les caractéristiques recherchées d'étanchéité et de résistance au cisaillement pour les joints de reprise d'un béton RCD peuvent être obtenues au moyen d'un traitement approprié de ces surfaces, et de l'application d'un mortier sur la surface de la levée. Les joints de reprise ainsi traités présentent les mêmes qualités que ceux d'un barrage en béton traditionnel.

dump trucks to transport RCD all the way, and the speed of construction was consequently improved.

b) Spreading

RCD should be spread into a layer of appropriate thickness without segregation. RCD is discharged from dump trucks, conveyor belts, or buckets with care to minimize segregation and is spread into uniform layers without segregation by several passes of bulldozers (Photo 4).

In Shimajigawa Dam [14, 67], RCD was spread in three or four thin layers of 0.15 to 0.20 m (6 to 8 in) thickness by bulldozers and compacted by vibratory rollers into one lift. Thin layer spreading brought satisfactory results. Thin layer spreading has the additional effect of being compacted by bulldozer.

At Tamagawa Dam [78], RCD was spread into thin layers of 0.25 m (10 in) thickness and was free from segregation even though a maximum size of aggregate of 150 mm (6 in) was used.

4.3.3.4. Compaction

The vibratory rollers used in RCD dam construction are the self-propelled types (Photo 5). The compaction mechanism of RCD by vibratory rollers is considered to be a combination of consolidation under the weight of the roller and flowing of mortar by vibration.

The required number of passes of the vibratory rollers can be judged from the subsidence of the surface of RCD and from the bleeding of paste. The standard number of passes of vibratory rollers is 2 without vibration followed by 6 passes with vibration for 0.5 m (20 in) lift thickness, and 2 passes without vibration followed by 12 passes with vibration for 0.7 m (28 in) lift thickness [38]. Disturbance of the RCD surface which is caused by starting or turning of the vibratory rollers should be minimized.

In compaction of RCD, the completed lane should be subjected to vibration together with the new lane by overlapping 0.2 to 0.5 m (8 to 20 in).

The compactibility is affected by the grading and shape of the aggregates and the RCD mixture. The best mixture should be found through field tests. The standard speed of vibratory rollers is 1 km/h (0.6 mile/h).

4.3.3.5. Treatment of lift joints

The required watertightness and shearing strength of the lift joints of RCD can be accomplished by appropriate treatment of lift joints and placement of mortar on the lift surfaces. The lift joints thus treated are as good as those of conventional concrete dams.

a) Traitement des joints de reprise

Il faut réaliser un bon traitement des joints de reprise. Les granulats non adhérents et la laitance seront éliminés et la surface sera nettoyée par des engins balayeurs et par des jets d'eau (Photos 6 et 7).

Malgré le ressuage relativement peu important du béton RCD, la grande surface que représentent les joints de reprise peut nécessiter l'utilisation d'engins tels que les balayeuses routières. Le délai de prise du béton RCD étant plus long que celui d'un béton traditionnel, il faut en tenir compte lorsqu'on fixe le moment du traitement du béton jeune.

Le ravitaillement des engins en carburants et en lubrifiants sera fait hors de la zone d'épandage pour éviter la pollution des joints.

b) Application de mortier

Une couche de mortier est appliquée sur la surface de reprise, avant épandage de la couche suivante (Photo 8). Ce mortier est appliqué en une couche de 15 mm au moyen d'un chargeur sur pneus, ou à la main, après nettoyage de la surface [78]. Les carottes prélevées dans le béton RCD durci indiquent la bonne qualité de la liaison due à la diffusion du mortier dans le béton [30, 65, 66].

4.3.3.6. Cure et protection de la surface

La surface de la levée du béton RCD est maintenue humide par aspersion. La méthode de protection du béton frais des surfaces amont et aval peut être celle adoptée pour les barrages en béton classique.

Par temps froid en hiver, la surface du béton est protégée contre l'air froid par une couche de matériau isolant [78].

Le bétonnage par temps chaud en été, par temps froid en hiver, ou par temps de pluie, est réglementé, comme pour un béton traditionnel. Les considérations spéciales à prendre en compte sont les suivantes [26, 78] :

— Compte tenu de l'impossibilité du refroidissement du béton RCD par serpents noyés, on interdit, si nécessaire, le bétonnage par temps chaud en été, pendant le jour. Une autre raison d'éviter le bétonnage par temps chaud est le risque de dessèchement de la surface du béton au contact de l'air rendant difficile le compactage.

— Compte tenu du faible dosage en eau du béton RCD, le béton frais est plus sensible à la pluie que le béton traditionnel. La mise en place sera interrompue pendant les pluies de plus de 2 à 4 mm/h. Les écoulements de l'eau de pluie venant des appuis seront évacués avant d'atteindre le chantier.

4.3.4. Méthodes de construction

4.3.4.1. Béton traditionnel de parement et maîtrise des percolations

Dans la technique de construction des barrages RCD, un béton traditionnel est placé dans les zones externes pour garantir la même pérennité que dans un barrage en béton traditionnel. Ce béton externe est compacté par des pervibrateurs. Le contact entre les deux types de béton doit être consolidé avec soin. Au barrage

a) Treatment of lift joints

The lift joints should be well treated. Loose aggregate particles and laitance should be removed and cleaned by motor sweepers and water jets (Photos 6 and 7).

Although the amount of bleeding from RCD is relatively small, the large area of lift joints may require machinery such as road sweepers. Since the setting time of RCD is longer than that of conventional concrete, the time of green cutting should be determined taking these features into account.

The machines should be fueled and oiled outside the placement area in order to keep the lift joints clean.

b) Placement of mortar

Mortar is placed on the lift joints before the RCD is placed (Photo 8). Mortar is placed into 15 mm (0.6 in) thickness by a wheel loader or by labor after the lift surface is cleaned [78]. The drilling cores of hardened RCD show the dispersement of mortar into RCD and good bond [30, 65, 66].

4.3.3.6. Curing and surface protection

The lift surface of RCD is cured by scattering water by sprinklers. The upstream and downstream surfaces can be cured as in conventional concrete dams.

In cold winter, the surface of the RCD should be protected from the cold air by covering with insulation materials [78].

Concreting in hot summer, cold winter, or during rainfall should be restricted similar to that of conventional concrete. Special considerations are as follows [26, 78] :

— Because RCD cannot be cooled by embedded cooling pipes, concreting during the daytime in hot summer should be avoided if necessary. Concreting in high air temperatures is also avoided because drying of the concrete surface makes RCD mixture compaction difficult.

— Since RCD has a small water content, fresh RCD is more sensitive to rainfall than conventional concrete. Placement of RCD should be suspended during rainfalls over 2 to 4 mm/h (0.08 to 0.2 in/h). Inflow of rain water from the abutments to the placed RCD should be treated properly.

4.3.4. Construction practices

4.3.4.1. Exterior conventional concrete and seepage control

In RCD dam construction, exterior conventional concrete is placed to ensure the same durability as in conventional concrete dams. Exterior conventional concrete is compacted by immersion vibrators. The interface of exterior conventional concrete and RCD must be consolidated very carefully. In Tamagawa Dam,

Tamagawa, le béton de parement était placé en premier et consolidé par des pervibrateurs, avant l'épandage du béton RCD. La liaison entre les deux bétons a été assurée, d'abord par des pervibrateurs, et ensuite par des rouleaux vibrants [78]. Cette méthode est illustrée dans la Fig. 21. Les carottes prélevées ont montré la parfaite liaison entre les deux bétons.

Le béton de l'évacuateur de crue, qui peut être soumis aux phénomènes de cavitation et d'abrasion par l'eau chargée de sable et de gravier, exige un soin particulier.

Dans un barrage RCD, on prévoit des joints transversaux, destinés à éviter la fissuration thermique et les fuites qui en résulteraient [46]. Ces joints transversaux sont découpés par une lame vibrante, montée sur un engin spécial (Photo 9) [26, 67]. La lame est enfoncée dans le béton RCD après épandage de celui-ci par les bulldozers. Des plaques (tôles galvanisées, PVC, etc.) sont introduites dans le joint, pour empêcher sa refermeture.

Au barrage Tamagawa, on a mis au point un dispositif à lame ayant une puissance vibratoire plus importante pour un béton RCD comportant des granulats de 150 mm. L'engin de base était une pelle hydraulique (PC 120), et la puissance vibratoire était quatre fois plus grande que celle d'une machine ordinaire [78].

Compte tenu de l'absence de coffrage au droit des joints transversaux dans un barrage RCD, on utilise un dispositif spécial pour fixer les waterstops sur les coffrages de parement. Cette technique est différente de celle utilisée dans un barrage en béton traditionnel.

4.3.4.2. *Dérivation provisoire, galeries, drainage interne*

Une galerie de dérivation provisoire est prévue dans les barrages RCD, pour évacuer, de façon sûre et économique, les crues survenant pendant les travaux; cette galerie est identique à celles utilisées pour les barrages en béton traditionnel.

Des galeries sont essentielles pour les visites de contrôle et parfois pour les travaux d'injection, comme dans un barrage en béton traditionnel. Mais diverses techniques nouvelles sont adoptées pour ne pas retarder le programme de bétonnage. Au barrage Tamagawa, on a utilisé des coffrages préfabriqués et des armatures [78]. Une autre innovation, destinée à permettre le passage au-dessus des galeries, consiste à découper une partie des coffrages et à construire une passerelle provisoire, avec les rampes et les supports nécessaires (Fig. 22).

Les barrages RCD étant aussi étanches que les barrages en béton classique, on suppose que le corps de l'ouvrage est exempt de percolations. Pour cette raison, on ne prévoit pas de drains internes, sauf au droit des joints transversaux.

4.3.4.3. *Évacuateurs de crue*

Les caractéristiques des évacuateurs de crue des barrages RCD sont les mêmes que celles des barrages en béton traditionnel. On utilise pour ces évacuateurs un béton traditionnel, riche en ciment, à caractéristiques élevées de pérennité et de résistance à l'abrasion. Pendant la construction, on apporte un soin particulier à la mise en place des coffrages de parement et à la qualité de la finition de la crête et du coursier de l'évacuateur, pour éviter la cavitation.

exterior conventional concrete was placed first and consolidated by immersion vibrators, followed by spreading of RCD. The interface of the two mixes was consolidated by immersion vibrators at first and then by vibratory rollers [78]. This procedure is shown in Fig. 21. Drilled cores showed a perfect bond between the two different mixes.

Concrete for the spillway, which may be subject to cavitation and exhaustion by sand and gravel, should be treated with special care.

In RCD dam construction, transverse joints are installed to prevent temperature cracks and the leakage of water through these cracks [46]. The transverse joints are formed by a vibrating blade mounted on joint-cutting machines (Photo 9) [26, 67]. The blade is inserted after spreading of RCD by bulldozers. The plates, such as galvanized iron sheet, polyvinyl chloride, etc., are installed into the joints in order to prevent them from reclosing.

In Tamagawa Dam, a blade with higher vibrating power to cope with RCD with a maximum size of aggregate of 150 mm (6 in) was developed. The base machine was a hydraulic shovel (PC-120), and the vibrating power was four times that of a conventional machine [78].

Since no forms are used at transverse joints in RCD dam construction, the waterstops should be fixed to the surface forms with a special device. This practice is different from that for conventional concrete dams.

4.3.4.2. *Diversion, galleries, and interior drainage*

A temporary diversion tunnel is installed in RCD dams to divert floodwater during the construction period safely and economically, which is the same as for conventional concrete dams.

Galleries are essential for inspection and sometimes for grouting works, as in conventional concrete dams. Various innovations are applied to install galleries without delaying the RCD placing schedule. In Tamagawa Dam, prefabricated forms and reinforcement bars were adapted [78]. Another innovation is to keep a passage over the galleries by cutting a part of the forms and installing mounts, ramps, and overbridges (Fig. 22).

Since RCD dams maintain good watertightness, as do conventional concrete dams, no seepage of water into the dam body is anticipated. Therefore, there is no internal drainage except along transverse joints.

4.3.4.3. *Spillways*

The requirements of spillways for RCD dams are no different from those for conventional concrete dams. Conventional rich concrete having high durability and abrasion resistance is used at spillways of RCD dams. During construction, placement of surface forms and finishing of the spillway crest and chute are carefully done to prevent cavitation.

4.3.5. Contrôle de la qualité

4.3.5.1. Généralités

Les principes du contrôle de la qualité d'un barrage RCD sont les suivants [5, 25, 29, 32, 40, 67, 78] :

- Les caractéristiques des granulats (granulométrie, densité, absorption d'eau, etc.) sont mesurées périodiquement, comme pour un béton traditionnel. Le contrôle de la granulométrie et de la teneur en eau des granulats fins est primordial.
- L'essai CV (compactage par vibration) est utilisé pour le contrôle de la consistance (voir ci-dessus).
- Il faut veiller à épandre le béton RCD à l'épaisseur spécifiée, sans ségrégation; le nombre de passes du rouleau vibrant est contrôlé avec soin.
- Le compactage du béton RCD est vérifié par contrôle visuel, mesure des tassements, et mesure de la densité par radio-isotope (Photo 10).
- Outre les essais normalisés de résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques, on prélève, dans le barrage, des carottes destinées à des contrôles visuels et à des essais de résistance à la compression et de résistance au cisaillement (Photo 11).

4.3.5.2. Formation et orientation

Divers dossiers sont préparés dans le cadre de l'assurance de la qualité des barrages RCD, comme pour les barrages en béton traditionnel. Les Entrepreneurs doivent établir un programme détaillé de travaux, transmis au Maître d'ouvrage pour discussion approfondie.

Il est essentiel que tous les intervenants (ingénieurs, conducteurs, ouvriers) se familiarisent avec les programmes de contrôle de la qualité et d'assurance de la qualité, par le biais d'essais en laboratoire et sur le site, effectués avant le début des travaux. Les planches d'essais sont particulièrement utiles pour la mise au point des techniques de construction à utiliser.

4.3.5.3. Granulométrie des granulats

La granulométrie des granulats, ainsi que la teneur en eau des sables et des petits graviers, sont contrôlées soigneusement, car ces paramètres ont une influence sur la consistance du béton RCD [32, 34, 65].

La forme des grains et les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur les propriétés du béton RCD [67]. Notamment, la granulométrie des granulats fins et la teneur en farine de roche influencent la consistance du béton RCD.

4.3.5.4. Malaxage

Le type de bétonnière utilisé a une influence sur la qualité du béton RCD. Le choix du type est important dans la construction des barrages RCD. Il faut procéder à des essais préalables, en malaxant tous les composants en vraie grandeur. L'usure des pales sera contrôlée périodiquement, car elle a une influence sur les performances des malaxeurs.

4.3.5. Quality control

4.3.5.1. General

The principles of quality control of RCD are as follows [5, 25, 29, 32, 40, 67, 78] :

— The grading, specific gravity, water absorption, etc., of aggregate are periodically tested in the same way as for conventional concrete. Control of grading and moisture content of fine aggregate is especially important in RCD.

— The vibration compaction (VC) test is used in consistency control.

— Care should be taken in spreading RCD into the required thickness without segregation, and the number of passes of vibrating rollers is carefully controlled.

— Compaction of RCD is confirmed by visual inspection, measurement of the settlement, and density measurement by radioisotope (Photo 10).

— Apart from the standard compressive strength test of cylinder specimens, drilled cores are taken from the dam body and are subjected to visual inspection, compressive strength tests, and shearing strength tests (Photo 11).

4.3.5.2. Training and orientation

In RCD dam construction, various manuals are prepared for assurance of quality control as in conventional dam construction. The contractors are to prepare the construction schedule in detail, and this is to be carefully discussed by the owner of the project.

It is important that the engineers, operators, and workers become familiar with the quality control and quality assurance program through the laboratory tests and the field tests performed before the execution of the work. The test fills are especially important to achieve the construction techniques.

4.3.5.3. Grading of aggregate

The grading of aggregate and the moisture content of sand and small gravel are to be carefully controlled because they affect the consistency of RCD [32, 34, 65].

The particle shape and properties of aggregate have a great influence on the properties of RCD mixture [67]. In particular, the grading of fine aggregate and the content of rock flour influence consistency of RCD.

4.3.5.4. Mixing

The type of mixer influences the quality of RCD mixture. Therefore, the selection of the type of mixer is important in RCD dam construction. The mixers should be tested beforehand by using RCD mixture mix with full size. The exhaustion of blades should be checked periodically because the ability of the mixers is influenced.

L'ordre d'introduction des composants dans la bétonnière peut modifier les caractéristiques du béton et doit être examiné avec soin. Les paramètres à déterminer par les essais sont : la quantité de chaque composant par gâchée, l'ordre d'introduction des matériaux et la durée de malaxage.

4.3.5.5. *Teneur en eau*

Les variations de teneur en eau exercent une grande influence sur les caractéristiques du béton RCD. Aussi est-il essentiel de contrôler la teneur en eau des granulats fins. Une attention particulière est à porter aux sables présentant une proportion élevée de fines [26].

Sur la plupart des chantiers de barrages RCD, on adopte un dispositif automatique de dosage de l'eau de gâchage, associé à la mesure en continu de la teneur en eau du sable [30]. De cette façon, la teneur en eau est réglée avec précision pour obtenir un béton RCD homogène dans le temps.

4.3.5.6. *Maniabilité*

La maniabilité résulte d'un ensemble complexe de différentes caractéristiques du béton frais. La consistance du béton RCD est mesurée par l'essai CV (compactage par vibration). La valeur CV obtenue est influencée par la température du béton, même à composition identique du mélange, la granulométrie des granulats et le type de ciment. De plus, la maniabilité du béton RCD varie, à consistance constante, en fonction de l'humidité et la température de l'air. Aussi, convient-il de tenir compte de ces paramètres lors du contrôle de la maniabilité du béton RCD.

4.3.5.7. *Densité*

Contrairement au cas des remblais en terre, il est difficile de mesurer la densité en place du béton RCD. Il faut établir, à l'aide d'essais sur le chantier, la relation entre la densité et le nombre de passes du rouleau vibrant, ce nombre étant un facteur de contrôle de densité. Les radio-isotopes sont également utilisés pour déterminer la densité.

4.3.5.8. *Mise en place du béton et liaison entre couches*

Sur un chantier de barrage RCD, le transport du béton s'effectue avec des reprises plus nombreuses que dans le cas d'un barrage en béton classique, donc avec des risques de ségrégation. Au barrage Tamagawa, les tas déversés étaient étalés soigneusement par des bulldozers (type 17 t), en couches de 0,25 m d'épaisseur, cet engin étant conduit de façon à ré-homogénéiser le béton [26, 66, 78]. Les gros granulats ont tendance à se concentrer sur les bords des bandes épandues, et doivent être remélangés par le bulldozer [78].

Les joints de reprise du béton RCD sont soigneusement traités et recouverts de mortier avant mise en place de la couche suivante. Le début de ce traitement est fixé en fonction de la température de l'air et de la température du béton RCD.

Les observations sur place, ainsi que l'examen des résultats d'essais de cisaillement conduits sur les carottes, indiquent une liaison tout à fait satisfaisante entre couches, la résistance au cisaillement sur les surfaces de reprise variant d'un cinquième à un septième de la résistance à la compression.

As the sequence by which each material is introduced into the mixer may affect the performance of the mix, it must be studied carefully. The quantity of materials for one batch, the sequence of material introduction into the mixer, and the mixing time must be determined by testing.

4.3.5.5. *Moisture*

Variation of the water content has a great influence on the properties of RCD mixture. Therefore, control of moisture content of fine aggregate is essential. Special care should be taken in moisture content control for sand with a high content of fine particles [26].

The automatic water batching system incorporated with continuous measuring of the moisture content of sand is employed in most RCD dam projects [30]. Thus, the moisture content is precisely controlled, and homogeneous RCD mixture is being produced.

4.3.5.6. *Workability*

Workability is a complex combination of various properties of fresh concrete. The consistency of RCD mixture is measured by vibrating compaction (VC) tests. The VC value is affected by temperature of RCD, even with the identical mix proportion, the grading of aggregates, and the type of cement. Moreover, the workability of RCD varies with the air temperature and humidity, even though the consistency is kept constant. Therefore, the workability of RCD should be controlled taking these parameters into account.

4.3.5.7. *Density*

The *in situ* density of RCD is difficult to measure, unlike density tests of soil materials. The relationship between the density and the number of passes of vibratory rollers should, therefore, be obtained through field tests, and then the number of passes should be used as a factor of density control. Radioisotope is also used for density control.

4.3.5.8. *Concrete placement and bond of lift joint*

In the RCD dam construction, RCD is subject to rehandling more times than in conventional concrete, and segregation of materials tends to occur. In Tamagawa Dam, the dumped piles were spread carefully by bulldozers (17 t class) in layers of 0.25 m (10 in) thickness, and the materials were remixed to make homogeneous RCD during the bulldozer operation [26, 66, 78]. The large gravel tends to concentrate at the sides of the spread lanes and should be remixed by bulldozer [78].

The lift joints in RCD are treated properly and covered by mortar before the next lift is placed. The start time of the surface treatment depends on the air temperature and the RCD temperature.

The observations and the results of the shearing tests of the drilled cores taken from RCD show that the bond is quite satisfactory and the shearing strength ranges from one-fifth to one-seventh of the compressive strength.

4.3.5.9. Maîtrise de la température

En ce qui concerne la maîtrise de la température, le béton RCD présente les caractéristiques particulières suivantes [22, 25, 44, 46, 48, 79] :

— L'épaisseur des levées du béton RCD étant égale à la moitié ou au tiers de celle du béton traditionnel, la température maximale est réduite par l'effet de dissipation de la chaleur à la surface de la levée.

— La quantité totale de chaleur d'hydratation est plus faible, par suite du faible dosage en liant.

— La surface des levées étant exposée à l'air pendant une courte période, on ne prévoit pas une baisse importante de la température au cours de la période de construction.

— Le refroidissement par serpentins noyés est pratiquement impossible.

Ainsi, les mesures suivantes sont prises pour limiter les effets thermiques dans un barrage RCD [25] :

— Choix d'un ciment à chaleur d'hydratation modérée.

— Réduction du dosage en ciment ou remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes.

— Réduction de l'épaisseur des levées.

— Contrôle et réglage de l'intervalle de temps entre levées.

— Refroidissement de la surface des levées.

— Pré-refroidissement.

4.3.5.10. Fréquence des essais pendant la construction

Les essais de contrôle de la qualité du béton RCD sont effectués régulièrement. Le Tableau 7 donne un exemple de programme de contrôle normalisé.

Tableau 7. — Exemple de programme de contrôle de la qualité d'un béton RCD
BÉTON RCD FRAIS

ESSAIS	PROCÉDURE	FRÉQUENCE	LIEU DE PRÉLÈVEMENT
Consistance (essai CV)	Vibration : 50 Hz Amplitude : 1 mm Moule : D = 240 mm H = 200 mm Surcharge : 20 kg	Toutes les heures	Bétonnière ou zone de mise en place
Teneur en air	JIS A 1128	Toutes les 2 heures	Bétonnière
Température du béton RCD	Thermocouple	Deux fois par jour	
Matériaux < 0,074 mm	JIS A 1103	Une fois par semaine	Bétonnière

4.3.5.9. Temperature control

RCD has the following features with respect to temperature control [22, 25, 44, 46, 48, 79] :

- Since the lift thickness of RCD is one-half to one-third of that of conventional concrete, the maximum temperature is lowered because of heat dissipation from the lift surface.
- The total amount of heat hydration is smaller because of low cementitious material content of RCD mixture.
- Since the lift surfaces are exposed to the air during only a short time, a large temperature drop is not anticipated during the construction period.
- Embedded pipe cooling is practically impossible.

Thus, the following temperature control measures are taken in RCD dam construction [25] :

- Use of moderate heat cement.
- Reduction of cement content or replacement of cement by fly ash.
- Reduction of lift thickness.
- Control and regulation of lift interval.
- Surface cooling of the lifts.
- Pre-cooling.

4.3.5.10. Frequency of quality control testing during construction

Tests for quality control of RCD should be performed periodically. Table 7 shows an example of the standards for quality control.

Table 7. — Example of standards for quality control of RCD

FRESH RCD

TESTS	TESTING PROCEDURES	INTERVAL	SAMPLING PLACE
Consistency test (VC test)	Vibration : 50 Hz Amplitude : 1 mm (0.04 in) Mold size : D = 240 mm (9 in) H = 200 mm (8 in) Surcharge : 20 kg (44 lb)	Once an hour	Mixing plant or placement site
Air content test	JIS A 1128	Once every 2 hours	Mixing plant
Concrete temperature measurement	Thermocouple	Twice a day	
Test for materials < 0.074 mm sieve	JIS A 1103	Once a week	Mixing plant

Nota :

- JIS A 1128 Méthode d'essai : teneur en air du béton frais par essai sous pression.
 ASTM C 231 Méthode d'essai normalisée : teneur en air du béton frais par essai sous pression.
 JIS A 1103 Méthode d'essai : quantité de matériaux passant le tamis 74 microns.
 ASTM C 117 Méthode d'essai normalisée : détermination par voie humide de la teneur en matériaux < 75 microns (tamis n° 200) des granulats minéraux.

Tableau 7 (suite)

BÉTON RCD DURCI

ESSAIS	PROCÉDURE	FRÉQUENCE	LIEU DE PRÉLÈVEMENT
<i>Résistance mécan.</i> Compression	JIS A 1108 ● Éprouvette : — Ø = 150 mm — H = 300 mm ● Compactage en 2 couches dans l'appareil CV; chaque couche compactée pendant au moins 30 secondes	Un essai pour 1 000 m ³ (9 éprouvettes par essai)	Bétonnière, ou zone de mise en place
Traction	JIS A 1113 ● Éprouvette identique à celle ci-dessus	Deux fois par mois (9 éprouvettes par essai)	Bétonnière
<i>Masse volumique</i> Échantillons écrêtés à 40 mm	JIS A 1116 ● Selon la méthode de préparation des éprouvettes d'essai à la compression	Une fois par jour	Bétonnière
Échantillons vraie grandeur 80 mm	JIS A 1132 ● Semaine type ● Selon la méthode de préparation des éprouvettes d'essai à la compression	Une fois par semaine	Bétonnière

Nota :

- JIS A 1108 Méthode d'essai : résistance à la compression du béton.

Notes :

- JIS A 1128 Method of Test for Air Content of Fresh Concrete by Pressure Method.
 ASTM C 231 Standard Test Method for Air Content of Fresh Mixed Concrete by the Pressure Method.
 JIS A 1103 Method of Test for Amount of Material Passing Standard Sieve 74 μm in Aggregates.
 ASTM C 117 Standard Test Method for Materials Finer than 75 μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregate by Washing.

Table 7 (Continued)

HARDENED RCD

TESTS	TESTING PROCEDURES	INTERVAL	SAMPLING PLACE
<i>Strength test</i> Compressive	JIS A 1108 <ul style="list-style-type: none"> ● Specimen size : — \varnothing 150 mm \times 300 mm — \varnothing 6 in \times 12 in ● Compacted by 2 layers using VC testing machine; compact each layer for 30 seconds or more 	Once for 1 000 m ³ (1 308 yd ³) (9 specimens per test)	Mixing plant or placement site
Tensile	JIS A 1113 <ul style="list-style-type: none"> ● Test specimen as in the case of compressive test 	Twice a month (9 specimens per test)	Mixing plant
<i>Unit weight test</i> Passing 40 mm (1.6 in) sieve	JIS A 1116 <ul style="list-style-type: none"> ● According to method of preparation of test specimens for compressive strength test 	Once a day	Mixing plant
Full size 80 mm (3 in)	JIS A 1132 <ul style="list-style-type: none"> ● Specimen week ● According to method of preparation of test specimens for compressive strength test 	Once a week	Mixing plant

Notes :

- JIS A 1108 Method of Test for Compressive Strength of Concrete.

ASTM C 39	Méthode d'essai normalisée : résistance à la compression des éprouvettes cylindriques de béton.
JIS A 1113	Méthode d'essai : résistance à la traction du béton, par fendage.
ASTM C 496	Méthode d'essai normalisée : résistance à la traction, par fendage, des éprouvettes cylindriques de béton.
JIS A 1116	Méthode d'essai : poids volumique et teneur en air (gravimétrie) du béton frais.
ASTM C 138	Méthode d'essai normalisée : poids volumique et teneur en air (gravimétrie) du béton.
JIS A 1132	Méthode de préparation et de cure des éprouvettes de béton.
ASTM C 192	Méthode d'essai normalisée : préparation et cure des éprouvettes d'essai en béton.

4.3.5.11. *Contrôle de l'épaisseur des levées*

Dans la construction des barrages RCD, le béton RCD est épandu, en trois ou quatre couches minces, par des bulldozers en vue d'éviter la ségrégation, les couches étant compactées ensemble en une seule levée par rouleau vibrant. Chaque couche de béton est épandue à l'épaisseur spécifiée de sorte qu'il y ait un bon compactage. Le niveau à laser tournant est bien adapté au guidage des conducteurs des bulldozers pour garantir l'épaisseur voulue (Photo 12). Ce type de niveau comporte une source de lumière (laser), le faisceau étant émis pour atteindre des récepteurs en tout point. Pendant l'opération d'épandage du béton, ce dispositif, monté sur un trépied, est placé à la hauteur voulue sur la surface de la couche, ou sur le coffrage. Un récepteur est fixé sur le bord supérieur de la lame du bulldozer. Ainsi, le conducteur peut régler la hauteur de la lame sur le niveau indiqué par le faisceau laser. Ce dispositif peut guider plusieurs bulldozers en même temps; il est efficace notamment sur les grands chantiers, où les conducteurs ne peuvent juger facilement, à l'œil, l'épaisseur de la couche.

4.3.5.12. *Planche d'essai*

Généralement, on procède à la construction d'une planche d'essai avant le début du chantier (Photo 13). La zone choisie est souvent celle du tapis de réception de l'ouvrage de dissipation d'énergie, ou celle du batardeau. La composition finale du béton RCD est fixée selon les résultats obtenus sur la planche d'essai, compte tenu des résultats des essais de laboratoire.

La réalisation d'une planche d'essai permet aux conducteurs d'engins de se familiariser avec le travail. Dans cette optique, la planche d'essai couvrira la plus grande surface possible.

4.4. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT

4.4.1. Généralités

L'évaluation du comportement des barrages RCD est identique à celle des barrages en béton traditionnel, puisque ces deux types de barrage sont étudiés selon la même doctrine. En effet, un barrage RCD doit présenter les mêmes caractéristiques de résistance, d'étanchéité et de pérennité qu'un barrage en béton traditionnel.

ASTM C 39	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
JIS A 1113	Method of Test for Splitting Tensile Strength of Concrete.
ASTM C 496	Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
JIS A 1116	Method of Test for Unit Weight and Air Content (Gravimetric) of Fresh Concrete.
ASTM C 138	Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
JIS A 1132	Method of Making and Curing Concrete Specimens.
ASTM C 192	Standard Test Method of Making and Curing Concrete Test Specimens.

4.3.5.11. *Control of lift thickness*

In RCD dam construction, RCD is spread into three or four thin layers by bulldozers in order to prevent segregation of RCD and is compacted into one lift by vibratory rollers. Each layer of the RCD should be spread to the specified thickness so that it can be compacted efficiently. The revolving laser level is well applied to assist the bulldozer operators in finishing the lift of specified thickness (Photo 12). The revolving laser level has a source of laser beam built in, and the beam spreads out so that the beam can be received at any point. During the spreading of RCD, it is fixed on a tripod and is set at a desired height on the placement surface or on the formworks. A level eye is attached to the top of the discharge plate of the bulldozers. Then, the operator can control the height of the discharge plate by following the beam indicating the specified height. This system can control many bulldozers simultaneously and is especially effective where the placement area is so large that the operators cannot perceive a sense of thickness easily.

4.3.5.12 *Test fill*

Before the construction of the dam, test fill of RCD is usually employed (Photo 13). The apron of the energy dissipator and the cofferdam often offer the area for test fill. The field mixture of RCD is determined in the test fill based on the specified laboratory mixture.

Test fill also offers an opportunity for the machinery operators to become accustomed to the work. In this sense, it is desirable for the area of test fill to be as large as possible.

4.4. PERFORMANCE EVALUATION

4.4.1. General

Performance evaluation for RCD dams is no different from that of conventional concrete dams because RCD dams are designed with the same philosophy as conventional concrete dams. The same strength, watertightness, and durability are necessary in RCD dams as in conventional concrete dams.

L'évaluation du comportement pendant la phase de construction du barrage repose sur les programmes de contrôle et d'assurance de la qualité, destinés à vérifier la conformité des ouvrages réalisés. En phase d'exploitation, le comportement est suivi par auscultation du barrage et de sa fondation. Il est nécessaire de mesurer certains paramètres pour vérifier le bon fonctionnement de l'ouvrage et obtenir des informations utiles pour l'étude et la réalisation des futurs barrages RCD.

4.4.2. Évaluation du comportement mécanique et de la sécurité des barrages terminés

Le barrage Shimajigawa, le premier barrage en béton compacté au rouleau construit dans le monde, a été achevé en 1980 [14]. Cet ouvrage a été construit pour la maîtrise des crues et l'alimentation en eau. La mise en eau a eu lieu il y a sept ans [47].

La sécurité a fait l'objet d'efforts considérables. Un de ses éléments primordiaux est la mesure des fuites. Aucune fuite n'est visible sur le parement aval de l'ouvrage (Photo 14), et le débit de percolation évacué par les drains de fondation ne dépasse pas 30 l/min; les débits de fuites des joints de contraction (retrait) des barrages RCD sont aussi faibles que ceux des joints des barrages en béton traditionnel [47].

Les déformations indiquées par les pendules traduisent un comportement normal. L'évacuateur de crue ne souffre d'aucune avarie, bien qu'il ait fonctionné plusieurs fois.

Les investigations détaillées conduites au barrage Shimajigawa pendant et après la construction n'ont mis en évidence aucune fissuration sur le parement amont, le parement aval, ou les parois de la galerie de visite (Photo 15), qui serait à l'origine de fuites. L'ouverture maximale des joints de contraction a été de 5 mm, et l'ouverture moyenne de 2,7 mm [47].

Le barrage Shimajigawa n'a connu aucun problème de comportement ou de sécurité [14]. Du point de vue du fonctionnement et du comportement, il est confirmé que les barrages RCD présentent le même niveau de sécurité que les barrages en béton traditionnel.

4.4.3. Étanchéité du béton RCD

L'étanchéité du béton RCD a été évaluée par les essais de perméabilité suivants [47] :

- essais de perméabilité en laboratoire, sur carottes prélevées dans le corps du barrage;
- essais de perméabilité *in situ*, en forage.

La perméabilité du béton RCD, mesurée en laboratoire, a varié de 10^{-8} à 10^{-10} m/s [67] et celle mesurée *in situ* était de 10^{-8} m/s environ [38, 39]. Aucune différence n'a été observée entre les valeurs mesurées au centre de la levée et sur les joints de construction (de reprise). L'étanchéité des deux zones est satisfaisante.

4.4.4. Évaluation de la qualité du béton RCD par carottage

La qualité du béton RCD mis en place est évaluée par examen visuel, par mesures de la masse volumique et de la résistance à la compression, et par essais de perméabilité sur des carottes prélevées dans le corps des barrages [67].

Performance evaluation during construction of the dam consists of quality control and quality assurance programs verifying the design requirements. After dam completion, performance is evaluated through monitoring the behavior of the dams and their foundations. Measurements are necessary to verify that the dams are safe and functioning as designed and to analyze data useful to the future design and construction of RCD dams.

4.4.2. Evaluation of completed dams from the viewpoint of structural behavior and safety

Shimajigawa Dam, the world's first roller compacted concrete dam, was completed in 1980 [14]. The dam is for flood control and municipal water supply. Seven years have passed since the first filling of the reservoir [47].

Considerable safety management has been conducted. The measurement of water leakage is one of the most important items for safety management. No water leakage is visible at the downstream face of the dam, as shown in Photograph 14, and the amount of seepage from foundation drains was not more than 30 l/min (8 gal/min), and the leakage from contraction joints of RCD dams was as small as that of the conventional concrete dams [47].

The deformations obtained from plumbline measurements have shown normal behavior. The spillway has sustained no damage although it has experienced several floods.

Detailed investigations of Shimajigawa Dam during and after construction revealed no cracking in the upstream face, the downstream face, or the inspection gallery (Photo 15) which might cause water leakage. The maximum opening of contraction joints was 5 mm (0.2 in) and the mean opening was 2.7 mm (0.1 in) [47].

Shimajigawa Dam has experienced no problems in its performance and safety [14]. From the viewpoint of the functioning and behavior of RCD dams, it is confirmed that they are as safe as conventional concrete dams.

4.4.3. Watertightness of RCD

Watertightness of RCD has been evaluated by the following permeability tests [47] :

- Laboratory permeability tests using drilled cores from the dam body.
- *In situ* permeability tests using the boreholes.

The permeability of RCD from the laboratory test was in the range of 10^{-8} to 10^{-10} m/s [67], and permeability from the *in situ* tests was approximately 10^{-8} m/s [38, 39]. The results showed no differences at the center of lifts and at construction joints. It was proved that both had satisfactory watertightness.

4.4.4. Quality evaluation of RCD by drilled cores

The quality of the placed RCD is evaluated by visual inspection, measurement of unit weight, compressive strength test, and permeability test for drilled cores from the dam bodies [67].

4.4.4.1. Évaluation par examen visuel des carottes

Un problème primordial du béton à consistance très sèche est posé par la présence d'une structure alvéolaire, due à la ségrégation des granulats. Ce problème a été résolu par l'adoption de couches de faible épaisseur et la conduite des bulldozers avec soin [38, 39]. Les carottes prélevées dans les barrages RCD indiquent des performances satisfaisantes (Photo 16). La bonne qualité des joints de reprise rend difficile leur identification sur les carottes.

Ces carottes confirment que les compositions adoptées pour les bétons RCD sont satisfaisantes et que l'épandage en couches minces (0,15 à 0,20 m d'épaisseur), ainsi que le traitement au mortier des surfaces de reprise, correspondent à une méthodologie efficace [69, 70].

Le Tableau 8 indique les critères d'évaluation des carottes par examen visuel [26, 47].

Tableau 8. Critères d'évaluation des carottes par examen visuel

ÉVALUATION	CRITÈRES VISUELS	CLASSE
Excellent	Béton RCD dense. Aspect équivalent à celui du béton traditionnel.	5
Bon	Aspect satisfaisant mais on observe certaines zones poreuses.	4
Imparfait	On observe certaines zones alvéolaires.	3
Médiocre	Le mortier ne remplit pas tous les vides entre les gros granulats. Le béton RCD présente une structure alvéolaire.	2
Très médiocre	Adhérence nulle des gros granulats. L'aspect général n'est pas celui d'un béton.	0

4.4.4.2. Résultats des essais à la compression

On a exécuté des essais à la compression sur des carottes prélevées dans le corps d'un certain nombre de barrages [34]. De tels essais ont été effectués sur tous les barrages RCD, comprenant Shimajigawa [14], Ohkawa, Tamagawa, etc.

Les résultats obtenus sur le béton RCD utilisé au barrage Tamagawa (granulats max = 150 mm, ciment + cendres volantes = 130 kg/m³, cendres / (ciment + cendres) = 30 %) [26] sont les suivants :

- La résistance à la compression des carottes, à 91 jours, varie de 15 à 25 MPa.
- La résistance à la compression de l'éprouvette cylindrique normalisée, d'un béton coulé dans un moule, identique à celui utilisé dans le barrage, et de même âge, a varié de 20 à 30 MPa, c'est-à-dire était supérieure de 20 à 30 % à la résistance mesurée sur carottes.

4.4.4.1. Evaluation by visual inspection of drilled cores

A crucial problem of extremely dry concrete is a honeycomb-like defect caused by segregation of aggregate. This problem has been solved by thin layer spreading and careful operation of bulldozers in the RCD method [38, 39]. The drilled cores from the RCD dams have good performance, as shown in Photograph 16. The lift joints are so perfect that the locations of the joints are hardly discernible.

These cores prove that the mix design of RCD is satisfactory and that spreading RCD in thin layers [0.15 to 0.20 m (6 to 8 in) thickness] and treating lift joints with placement of mortar are effective [69, 70].

Table 8 shows the criteria for evaluation of drilled cores by visual inspection [26, 47].

Table 8. — Criteria for evaluation of drilled cores by visual inspection

ITEM	CRITERIA BY VISUAL INSPECTION	POINT
Excellent	RCD is dense. Appearance is as good as that of conventional concrete.	5
Good	Appearance is good although some porous parts are visible.	4
Imperfect	Some honeycomb-like parts are visible.	3
Poor	Mortar is not filled completely among coarse aggregates. RCD is honeycomb-like.	2
Very poor	Coarse aggregates are detached. No appearance of concrete.	0

4.4.4.2. Results of compressive tests for drilled cores

Drilled cores taken from the dam bodies were subjected to compressive tests [34]. These tests have been employed in all RCD dams including Shimajigawa Dam [14], Ohkawa Dam, Tamagawa Dam, etc.

The following are the results for RCD used at Tamagawa Dam [G max 150 mm (6 in), C + F = 130 kg/m³ (219 lb/yd³), F/C + F = 30 %] [26] :

— The compressive strength of the drilled cores at the age of 91 days was 15 to 25 MPa (2 133 to 3 555 lb/in²).

— The compressive strength of the standard cylindrical specimen cast in molds with the same mixture and at the same age was 20 to 30 MPa (2 844 to 4 266 lb/in²), which is 20 to 30 % larger than that of the drilled cores.

— La résistance à la compression des éprouvettes cylindriques normalisées, mesurée à 365 jours, est de 30 MPa (Fig. 23).

— La densité des carottes varie de 2 400 à 2 500 kg/m³, ce qui correspond à plus de 98 % de la densité maximale théorique sans vides.

— La densité et la résistance à la compression des carottes présentent un coefficient de corrélation élevé.

4.5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

4.5.1. Généralités

Les premières recherches sur le béton RCD au Japon datent de 1974, lorsque le « Comité de Recherche sur la Construction Rationalisée des Barrages en Béton » fut constituée, sous la tutelle du Ministère de la Construction Japonais. En 1976, un premier essai en vraie grandeur a été exécuté; il s'agissait du batardeau amont du barrage Ohkawa (volume = 10 000 m³) (voir Tableau 9). La confirmation de la possibilité de compacter du béton RCD par rouleaux vibrants marqua un grand progrès dans l'application de ce matériau à la construction des barrages. La méthode de création des joints de contraction (de retrait) par lames vibrantes fut également validée [34]. En 1977, on décida la réalisation du barrage Shimajigawa et de la couche d'assise du barrage Ohkawa [14]. Au début de l'année 1978, une planche d'essai a été exécutée au droit du puits de reconnaissance du site de Shimajigawa et les dispositions à prendre ont été mises au point : composition du béton RCD, méthodes de mise en place, programme des travaux [14, 30].

La mise en place du béton RCD débuta en septembre 1978 au barrage Shimajigawa, et en 1979 au barrage Ohkawa. Le bétonnage était achevé en 1980 sur les deux ouvrages, confirmant la rapidité et l'économie de la technique de construction.

En 1983, la mise en place du béton RCD commença au barrage Tamagawa (H = 100 m; V = 1,14 hm³). Des études approfondies furent entreprises, pour définir le meilleur dispositif de transport et de mise en place du volume important de béton et pour choisir sa composition. Contenant des granulats de 150 mm, le béton RCD a été mis en place et compacté en levées de 0,75 à 1,0 m d'épaisseur [5]. Le béton RCD a également été utilisé pour le bassin d'amortissement du barrage Shinakano, achevé en 1986 [30].

En 1986, cinq barrages RCD sont en construction : Tamagawa, Pirika, Mano, Shiromizugawa et Asahiogawa. Les marchés des travaux sont déjà passés pour les barrages Nunome, Asari, Kodama, Kamuro, Dodairagawa et Sakaigawa. Les barrages suivants sont au stade d'avant-projet détaillé : Miyagase (H = 155 m; V = 2,2 hm³) et Gassan (H = 125 m; V = 1,5 hm³).

La technique de construction des barrages RCD permet des performances excellentes et s'est avérée rapide, économique et sûre.

— The compressive strength of the standard cylindrical specimens at the age of 365 days was 30 MPa (4 266 lb/in²), as shown in Fig. 23.

— The density of the drilled cores was 2 400 to 2 500 kg/m³ (4 045 to 4 214 lb/yd³), which is over 98 % of the theoretical maximum density without air void.

— The density and the compressive strength of the drilled cores have a high correlation coefficient.

4.5. RESEARCH AND DEVELOPMENT

4.5.1. General

The first research on RCD in Japan dates back to 1974 when the Research Committee on the Rationalized Construction of Concrete Dams was established under the leadership of the Ministry of Construction, Japanese Government. In 1976 the first full-scale field test was made at the upstream cofferdam of Ohkawa Dam, with a volume of 10 000 m³ (13 080 yd³) (see Table 9). Confirmation of the compaction of RCD by vibratory rollers was a great step forward in the application of RCD to dam construction. The method of installing contraction joints by vibrating joint cutters was also confirmed [34]. In 1977, the decision was made on the construction of Shimajigawa Dam and the concrete base mat of Ohkawa Dam [14]. At the beginning of 1978, the test fill was employed at the test pit of Shimajigawa damsite and the final decision was made on the mixture proportion of RCD, placement procedures, and the construction schedule [14, 30].

RCD placement of Shimajigawa Dam commenced in September 1978, and of Ohkawa Dam in 1979. In 1980, the placement of RCD was completed at both dams and the rapid and economical construction of RCD was confirmed.

In 1983, the placement of RCD was commenced at 100 m (328 ft) high Tamagawa Dam with a volume of 1.14 million m³ (1.5 million yd³). Comprehensive studies were made for the efficient transportation and placement of a large volume of RCD and the mixture design of RCD. RCD mixture with a 150 mm (6 in) maximum size of aggregate was successfully placed and consolidated into 0.75 to 1.0 m (30 to 39 in) lifts [5]. RCD was also applied to the stilling basin of Shin-nakano Dam and completed in 1986 [30].

RCD is being placed at five dams in 1986 : Tamagawa Dam, Pirika Dam, Mano Dam, Shiromizugawa Dam, and Asahiogawa Dam. Other dams which have already been contracted to be constructed include Nunome Dam, Asari Dam, Kodama Dam, Kamuro Dam, Dodairagawa Dam, and Sakaigawa Dam. Detailed design is also being employed for Miyagase Dam [height = 155 m (509 ft); volume = 2.2 million m³ (2.6 million yd³)] and Gassan Dam [height = 125 m (410 ft); volume = 1.5 million m³ (1.6 million yd³)].

The RCD dam construction has achieved successful performance and has proven to be a rapid, economical and reliable dam construction method.

Tableau 9. — Résultats du plot d'essai au barrage Ohkawa

Désignation	C + V (kg/m ³)	$\frac{E}{C + V}$	Rc des carottes			K = perméabilité moyenne des carottes (m/s)
			Épaisseur des levées (m)	Age (mois)	Rc moy. (MPa)	
V 3	120	0,80	0,5	20	20,1	$4,2 \cdot 10^{-8}$
P 3	120	0,85	0,5	21	16,0	$4,5 \cdot 10^{-6}$

C = Ciment; V = Cendres Volantes; E = Eau
Rc = Résistance à la compression.

4.5.2. Études terminées

4.5.2.1. Choix de la composition et contrôle de la qualité

a) Appareil de mesure de la consistance (appareil CV)

Le béton RCD est trop raide pour permettre la mesure de la consistance par les essais d'affaissement classiques. Pour cette raison, on a mis au point deux appareils dérivés de l'appareil Vebe. Le grand appareil ($\varnothing = 480$ mm, H = 400 mm) est destiné à la détermination de la composition d'un béton RCD comportant les plus gros granulats. Le petit appareil ($\varnothing = 240$ mm, H = 200 mm) est utilisé lors des études préliminaires de la composition du béton RCD et pour le contrôle de la qualité pendant les travaux.

Dans cet essai, un cylindre en acier placé sur une table vibrante est rempli de béton RCD, une plaque en plastique transparent étant posée sur la surface du matériau. Un poids est placé sur cette plaque. Le béton est compacté par vibrations de 1 mm d'amplitude, à la fréquence de $\frac{4\ 000}{60}$ Hertz. On mesure le temps nécessaire au remplissage des vides entre les gros éléments par le mortier, et à l'arrivée de la pâte de ciment sur la surface. Ce temps (en secondes) est appelé l'indice de « compactage par vibration » (valeur CV).

Il existe une corrélation étroite entre le nombre de passes du rouleau vibrant, nécessaire à la consolidation du béton RCD, et la valeur CV. La composition du béton RCD est déterminée pour obtenir une valeur CV convenable.

Pour le contrôle de la qualité pendant la construction, on utilise l'appareil CV standard. La valeur CV est mesurée après écrêtage à 40 mm, par voie humide [32].

Table 9. — Results from test fill at Ohkawa Dam

Identification	C + F kg/m ³ (lb/yd ³)	$\frac{W}{C + F}$	Comp. strength of drilled cores			Average permeability coefficient of drilled cores, K (m/s)
			Lift height m (in)	Age (months)	Average comp. strength MPa (lb/in ²)	
V ₃	120 (202)	0.80	0.5 (20)	20	20.1 (2 858)	4.2×10^{-8}
P ₃	120 (202)	0.85	0.5 (20)	21	16.0 (2 275)	4.5×10^{-6}

C = Cement; F = Fly Ash; W = Water

4.5.2. Completed research

4.5.2.1. Mix design and quality control

a) VC consistency meter

RCD mixture is too stiff to measure the consistency by conventional slump tests. Two consistency meters were therefore developed which are similar to the Vebe apparatus. The larger consistency meter has a size of $\varnothing 480 \times 400$ mm (19 × 16 in) and is used to determine the mix proportion of RCD with a maximum size of aggregate. The smaller consistency meter has a size of $\varnothing 240 \times 200$ mm (9 × 8 in), which is used in preliminary studies of the mixture proportion of RCD and in quality control during construction.

A steel cylinder on a vibrating table is filled with RCD, and a transparent plastic plate is placed on the RCD. A weight is set on the plate. RCD is compacted at a vibration of 4 000 r/min with an amplitude of 1 mm (0.04 in). The time is measured until the voids between the particles of coarse aggregate are filled with mortar and the cement paste has risen to the RCD surface. The time in unit of seconds is called the vibrating compaction (VC) value.

RCD is a close relationship between the number of passes of vibratory rollers to consolidate RCD and the VC value. The mixture proportion of RCD is determined so that RCD has a suitable VC value.

In quality control during construction, standard VC consistency meters are used. The VC value is measured for RCD mixture after wet screening the coarse aggregate over 40 mm (1.6 in) [32].

b) Choix de la composition du béton RCD

La consolidation du béton RCD par les rouleaux vibrants est plus difficile à obtenir que dans le cas de la pervibration du béton traditionnel. Aussi, la composition de ce béton est-elle soigneusement étudiée pour permettre le bon compactage au rouleau.

La valeur du rapport sable/granulats peut être fixée à partir de la valeur CV obtenue par une série d'essais, les dosages en liant et en eau étant maintenus constants.

Le béton fabriqué à partir des premiers résultats est mis en place dans les planches d'essais, en une couche d'épaisseur déterminée, et compacté par les rouleaux vibrants afin de confirmer sa compactibilité. Le carottage dans les planches d'essais permet de contrôler la résistance mécanique du béton [38].

4.5.2.2. Méthodes de construction économique

L'augmentation de l'épaisseur des levées est souhaitable pour réduire la durée et le coût de construction. Les études exécutées en ce sens sont nombreuses. Il n'est pas toujours possible d'éviter la ségrégation lors du déversement du béton RCD par les camions à benne basculante, compte tenu de la raideur du béton. Ce risque augmente avec l'épaisseur de la levée. Le béton RCD affecté par la ségrégation est trop difficile à compacter au rouleau vibrant, ce qui conduit à une faible étanchéité et une faible résistance mécanique.

Les études détaillées exécutées lors de la réalisation du barrage Shimajigawa [14] ont montré l'absence de défauts lorsque le béton était épandu par bulldozers en couches minces de 0,15 à 0,20 m d'épaisseur et compacté en une seule levée par rouleaux vibrants. Cette méthode a permis la réalisation de levées de 0,5 à 0,7 m d'épaisseur [67]. Cette valeur est passée à 1,0 m au barrage Tamagawa [5].

Les performances des rouleaux vibrants (énergie de compactage, rapidité de compactage) ont été étudiées. Ces études ont porté sur la charge par essieu, l'amplitude et la fréquence de la vibration et la vitesse de déplacement. Généralement, on utilise des engins tandem Bomag BW-200 [39].

4.5.2.3. Traitement des joints de reprise

Les joints de reprise sont autant de plans de faiblesse qu'il convient de traiter pour assurer leur résistance et leur étanchéité. L'application d'une couche de mortier de 15 mm d'épaisseur sur ces joints donne d'excellents résultats. Ce mortier est nécessaire, non seulement pour obtenir une bonne liaison entre levées, mais aussi pour éliminer le risque de poches ou d'alvéoles d'air juste au-dessus du joint [39].

4.5.2.4. Joints de contraction transversaux

Les joints de contraction (retrait) transversaux sont aménagés dans les barrages RCD tous les 15 m, dans le but d'éliminer une fissuration thermique irrégulière. Ces joints sont découpés par une lame vibrante, avant compactage du BCR par les rouleaux vibrants. La lame pénètre par vibration, la refermeture du joint étant empêchée par la mise en place de plaques métalliques dans le joint.

b) Mix design of RCD

Consolidation of RCD by vibrating rollers is more difficult than consolidation of conventional concrete by immersion vibrators. RCD mixture should be so designed that it can be compacted efficiently by vibratory rollers.

The most suitable sand-aggregate ratio of RCD mixture can be determined from the VC value after the series of tests, while maintaining cementitious material content and water content constant.

Concrete of a tentatively specified mixture is placed to the specified thickness of a lift in the test field and is compacted by vibration rollers in order to confirm the compactibility of RCD. The cores drilled from the test fill are used to confirm the strength of RCD [38].

4.5.2.2. Efficient construction procedures

Increasing the lift thickness is desired to achieve the shortest construction period and the most economical construction procedure. Many studies have been made in order to increase the lift thickness of RCD. Segregation of RCD may be inevitable in the process of dumping from dump trucks because of the stiff consistency of RCD. This tendency is more significant for thicker lifts of RCD. RCD with segregation is too difficult to compact by vibratory rollers and results in low watertightness and strength.

Comprehensive studies were made in the construction of Shimajigawa Dam [14], and it was found that no defects were observed when RCD was spread into thin layers of 0.15 to 0.20 m (6 to 8 in) by bulldozers and then compacted into one lift by vibratory rollers. This procedure enabled a lift thickness of 0.5 to 0.7 m (20 to 28 in) [67]. The lift thickness was increased to 1.0 m (39 in) at Tamagawa Dam [5].

The capacity of vibratory rollers was examined in terms of compaction energy and the compaction speed. The studies included the shaft load, the amplitude and frequency of the vibrating wheels, and the travelling speed of vibratory rollers. Bomag BW-200 tandem vibratory rollers are usually used in RCD dam construction [39].

4.5.2.3. Lift joint treatment

Lift joints are the potentially weak planes in the dams and should be treated to ensure strength and watertightness. Spreading mortar on lift joints into a 15 mm (0.6 in) thickness yields extremely good results. Spreading mortar is necessary not only to obtain a good bond between lifts but also to prevent air pockets or honeycomb in the RCD just above the lift joints [39].

4.5.2.4. Transverse contraction joints

Transverse contraction joints are provided in RCD dams at 15 m (49 ft) intervals to prevent irregular temperature cracking. Transverse contraction joints are installed by vibrating joint cutters before consolidation of the RCD by vibrating rollers. The procedure for joint cutting consists of inserting a blade into RCD with vibration and installing the plates into the joints to prevent them from reclosing.

L'ouverture des joints transversaux dans les barrages RCD en exploitation confirme leur utilité dans les barrages RCD. Sans ces joints, on pourrait s'attendre à un réseau aléatoire de fissures causant des fuites à travers le barrage [39].

4.5.2.5. *Étanchéité*

L'étanchéité du béton RCD est confirmée par des essais d'eau en forage. La Fig. 24 présente les résultats des essais exécutés au barrage Ohkawa. Pour ces essais, le forage a été divisé en 10 zones (5 sans joint de reprise, 5 avec joint). La perméabilité du BCR variait de $2,9 \cdot 10^{-9}$ à $7,4 \cdot 10^{-8}$ m/s, traduisant une étanchéité parfaite. Les parois sèches des galeries de visite des barrages RCD en exploitation confirment également cette étanchéité.

L'étanchéité des barrages RCD est assurée par la bonne qualité du béton RCD, de même que par le béton classique externe et par la réalisation de joints de contraction transversaux.

4.5.2.6. *Résistance au gel-dégel*

Sur les barrages RCD on trouve une zone de béton traditionnel sur les parements (de 1,5 à 3,0 m d'épaisseur). Comme les barrages en béton traditionnel, les barrages RCD présentent donc une bonne résistance à l'action du gel-dégel.

4.5.3. **Recherches futures**

4.5.3.1. *Caractéristiques du béton RCD*

Mécanisme de compactage du béton RCD : Diverses études ont confirmé que ce matériau était bien adapté à la réalisation de tous les grands barrages. Cependant, le mécanisme de compactage du béton RCD est toujours mal connu. Il faut poursuivre les recherches pour définir des techniques de construction plus efficaces : réduction du temps de compactage, augmentation de l'épaisseur des levées.

Définition de la composition du béton : Jusqu'à présent, cette composition a été étudiée au moyen d'essais en laboratoire et sur le chantier. Cependant, il convient d'exécuter des études visant à établir des méthodes plus efficaces de détermination de la composition à adopter.

4.5.3.2. *Poursuite de l'amélioration des méthodes de construction*

Traitement des surfaces de reprise : Un bon traitement des surfaces de reprise est nécessaire, afin de réduire les insuffisances de résistance et d'étanchéité. Comme le béton RCD est caractérisé par une faible quantité de laitance à la surface de la levée, il faut rechercher un traitement efficace de cette surface. La finition au rouleau sur pneus a donné de bons résultats. Il est nécessaire de mettre au point des engins nouveaux destinés à améliorer le rendement et à économiser la main-d'œuvre.

Amélioration des engins de chantier : Elle est nécessaire pour améliorer les rendements des opérations de construction.

The opening of transverse joints in the completed RCD dams proves the need for transverse joints in RCD dams; otherwise, random cracking would be expected which causes water leakage [39].

4.5.2.5. *Watertightness*

Watertightness of RCD has been confirmed by water pressure tests using the boreholes. Fig. 24 shows the results of the tests at Ohkawa Dam. The tests were conducted for 10 sections in the hole, 5 without a lift joint and 5 with a lift joint. The permeability of RCD was in the range of 2.9×10^{-9} to 7.4×10^{-8} m/s, which proved the perfect watertightness. The dry surface of the walls of inspection galleries in completed RCD dams also proves watertightness.

The watertightness of RCD dams is achieved by the good quality of RCD as well as by exterior conventional concrete and the installation of transverse contraction joints.

4.5.2.6. *Resistance to freezing and thawing*

RCD dams have 1.5 to 3.0 m (5 to 10 ft) thick exterior conventional concrete in the surface of the dams, the same as conventional concrete dams. Since conventional concrete dams have high resistance to freezing and thawing, RCD dams do not have any problems.

4.5.3. **Future research**

4.5.3.1. *Properties of RCD*

— Compaction mechanism of RCD. — Various studies on RCD have proven that RCD can be applied to any high dams. However, the compaction mechanism of RCD has not been understood. Further research is required to achieve more efficient construction procedures by decreasing the compaction time and increasing the lift thickness.

— Mix design procedures. — Mix designs of RCD have been determined by laboratory tests and field tests. However, further studies should be conducted to establish more efficient procedures for determining the mixture proportion of RCD.

4.5.3.2. *Further improvement of construction procedures*

— Efficient treatment of lift joints. — Lift joints should be well treated in order to minimize defects in strength and watertightness. RCD is, however, featured by extremely little laitance on the lift surfaces, and efficient treatment of lift joints should be studied. Finishing by tire rollers has proven to have good results. Development of new machinery for treatments is required to improve construction efficiency and save labor work.

— Improvement of construction machinery. — The improvement of machinery will be necessary for more efficient RCD construction.

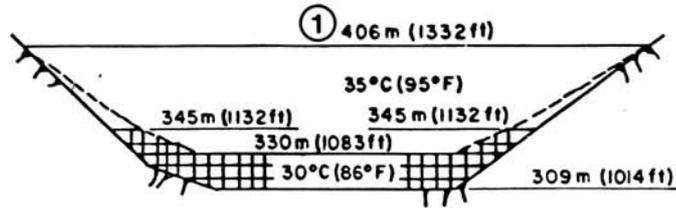


Fig. 13

Tamagawa Dam - Allowable maximum temperature.
Barrage Tamagawa - Température maximale admissible.

(1) Dam crest. (1) Crête du barrage.

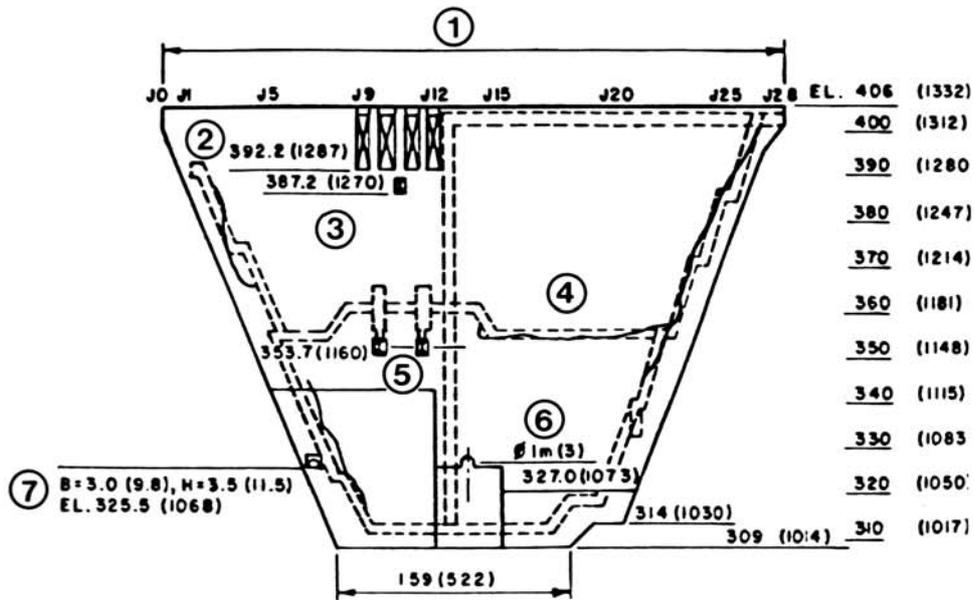


Fig. 14

Layout of outlet works and galleries structures, m (ft).
Disposition des ouvrages d'évacuation et des galeries, m (ft).

- | | |
|--|---|
| (1) Crest length : 441.5 m (1 449 ft). | (1) Longueur en crête : 441,5 m. |
| (2) Crest gate. | (2) Vannes de surface. |
| (3) Orifice gate. | (3) Vanne en charge. |
| (4) Intermediate gallery. | (4) Galerie intermédiaire. |
| (5) Conduit gate. | (5) Vanne de conduite. |
| (6) Pipe for city water supply. | (6) Conduite d'approvisionnement en eau de ville. |
| (7) Diversion tunnel. | (7) Galerie de dérivation. |

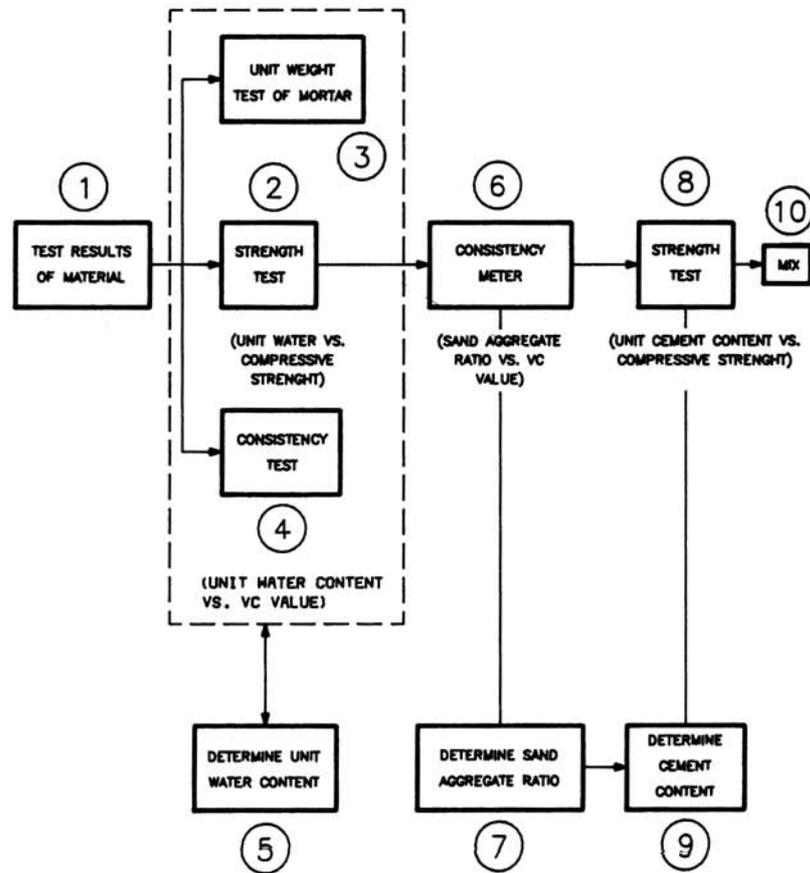


Fig. 15

Flow chart of mixture design.

Diagramme d'étude de la composition du béton.

- | | |
|---|--|
| (1) Résultats d'essais des matériaux. | (6) Appareil de mesure de la consistance (rapport sable/granulats en fonction de l'indice CV). |
| (2) Essais de résistance (dosage en eau en fonction de la résistance à la compression). | (7) Détermination du rapport sable/granulats. |
| (3) Masse volumique - Essais du mortier. | (8) Essais de résistance (dosage en ciment en fonction de la résistance à la compression). |
| (4) Essais de consistance (teneur en eau en fonction de l'indice CV). | (9) Détermination du dosage en ciment. |
| (5) Détermination du dosage en eau. | (10) Composition du béton. |

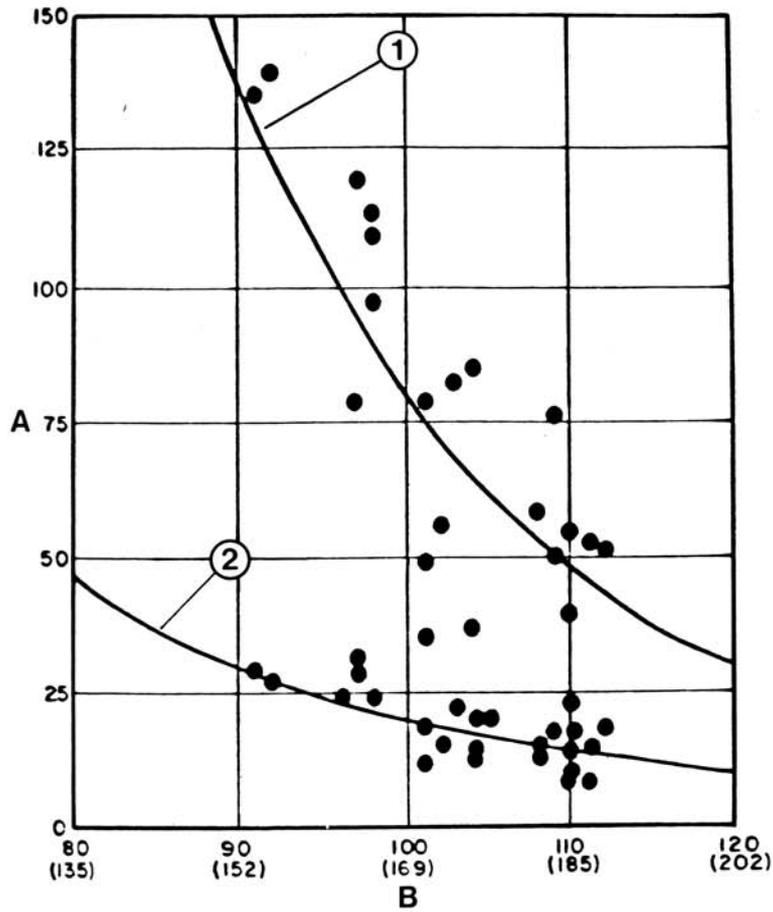


Fig. 16

Relation between unit water content and VC value in cases of using large and standard-sized consistency meters [C + F = 120 kg/m³ (202 lb/yd³)].

Relation entre le dosage en eau et l'indice CV (compactage par vibration) dans le cas d'utilisation d'appareils de mesure de consistance de deux types : standard et grande taille (ciment + cendres volantes = 120 kg/m³).

(A) VC value (seconds).

(B) Unit water content - kg/m³ (lb/yd³).

(1) Large container.

(2) Standard container.

(A) Valeur CV (secondes).

(B) Dosage en eau - kg/m³.

(1) Appareil grande taille.

(2) Appareil standard.

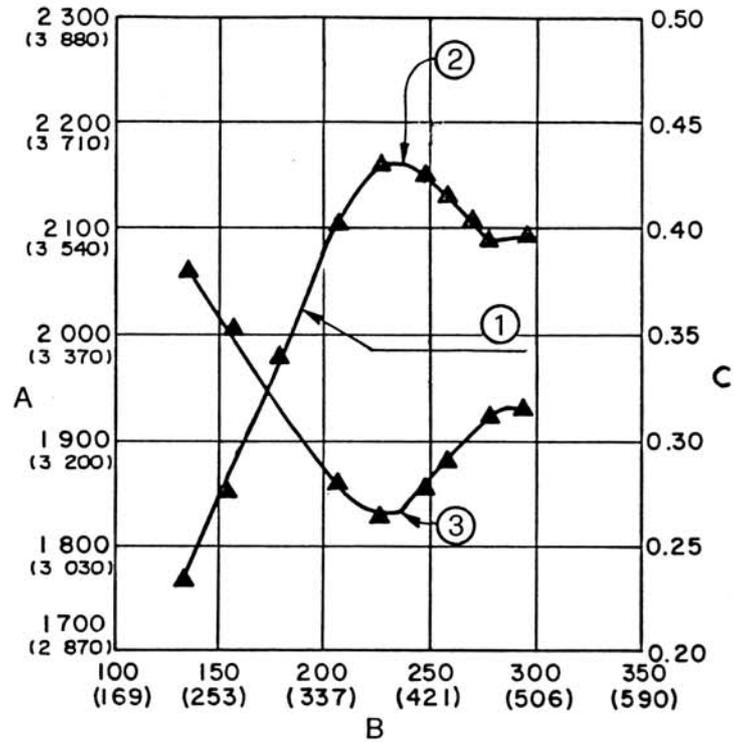


Fig. 17

Unit weight test of mortar.

Essai de masse volumique du mortier.

- | | |
|---|---|
| (A) Unit weight of mortar - kg/m^3 (lb/yd^3). | (A) <i>Masse volumique du mortier - kg/m^3 (lb/yd^3).</i> |
| (B) Water content of mortar - kg/m^3 (lb/yd^3). | (B) <i>Dosage en eau du mortier - kg/m^3 (lb/yd^3).</i> |
| (C) Porosity. | (C) <i>Porosité.</i> |
| (1) $\text{S}/\text{C} + \text{F} = 5.0$. | (1) <i>Rapport sable/ciment + cendres volantes = 5,0.</i> |
| (2) Unit weight. | (2) <i>Masse volumique.</i> |
| (3) Porosity. | (3) <i>Porosité.</i> |

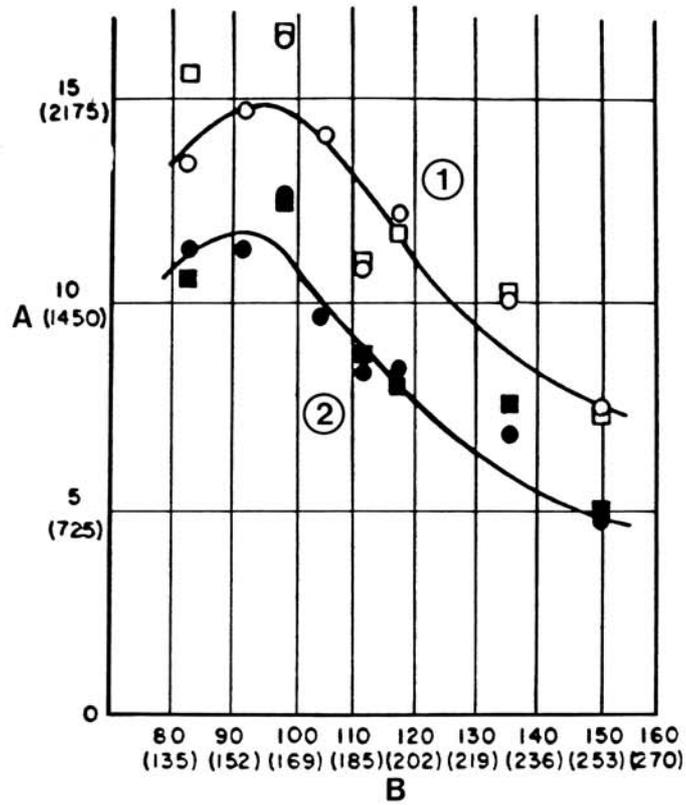


Fig. 18

Relation between unit water content and compressive strength of RCD
 [C + F = 120 kg/m³ (202 lb/yd³)].

Relation entre le dosage en eau et la résistance à la compression du béton RCD
 (ciment + cendres volantes = 120 kg/m³).

(A) Compressive strength - MPa (lb/in²).

(B) Unit water content - kg/m³ (lb/yd³).

(1) Strength 91 days.

(2) Strength 28 days.

(A) Résistance à la compression - MPa (lb/in²).

(B) Dosage en eau - kg/m³ (lb/yd³).

(1) Résistance à 91 jours.

(2) Résistance à 28 jours.

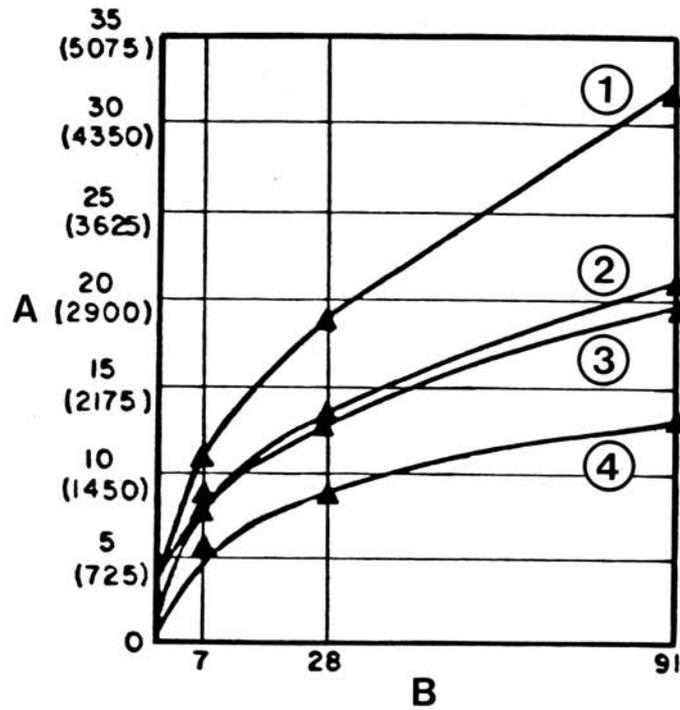


Fig. 19

Relation between unit content of cementitious materials and compressive strength.

Relation entre le dosage en liant et la résistance à la compression.

(A) Compressive strength, MPa (lb/in²).

(A) Résistance à la compression, MPa (lb/in²).

(B) Age, days.

(B) Age, jours.

(1) C + F = 150 kg/m³ (253 lb/yd³).

(1) Ciment + cendres volantes = 150 kg/m³.

(2) C + F = 130 kg/m³ (219 lb/yd³).

(2) Ciment + cendres volantes = 130 kg/m³.

(3) C + F = 120 kg/m³ (202 lb/yd³).

(3) Ciment + cendres volantes = 120 kg/m³.

(4) C + F = 100 kg/m³ (169 lb/yd³).

(4) Ciment + cendres volantes = 100 kg/m³.

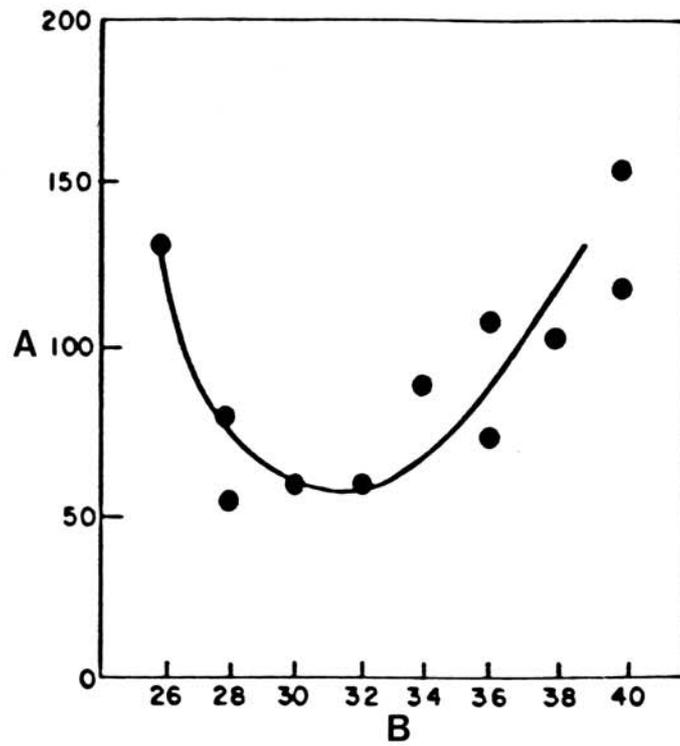


Fig. 20

Example showing relation of sand-aggregate ratio and VC value in dam concrete.

$C + F = 130 \text{ kg/m}^3$ (219 lb/yd³)

$W = 98 \text{ kg/m}^3$ (165 lb/yd³).

Exemple montrant la relation entre le rapport sable/granulats et la valeur CV d'un béton de barrage.

Ciment + cendres volantes = 130 kg/m³

Eau = 98 kg/m³.

(A) VC value (seconds).

(A) Valeur CV (secondes).

(B) Sand - Agregate ratio.

(B) Rapport sable/granulats.

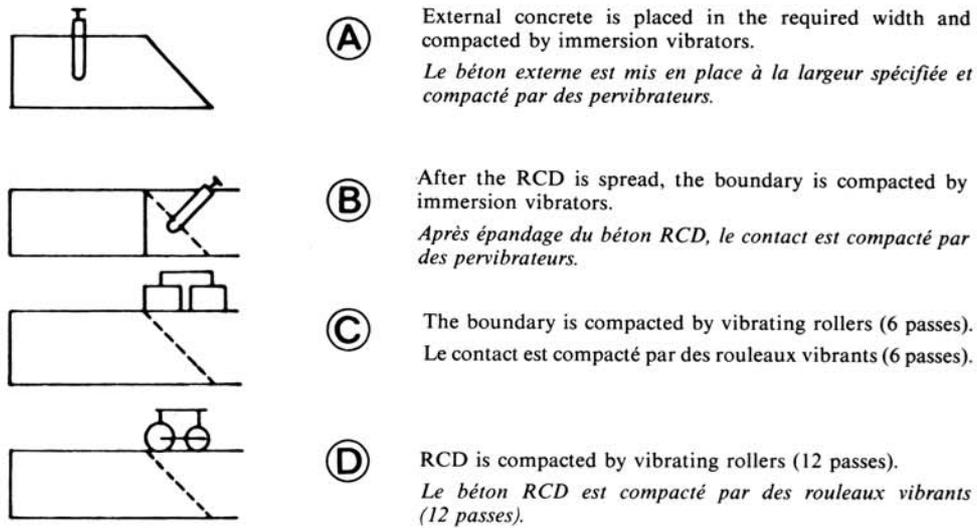


Fig. 21

Compaction of interface of the two mixtures (conventional concrete and RCD).
Compactage du contact entre les deux bétons (béton traditionnel et béton RCD).

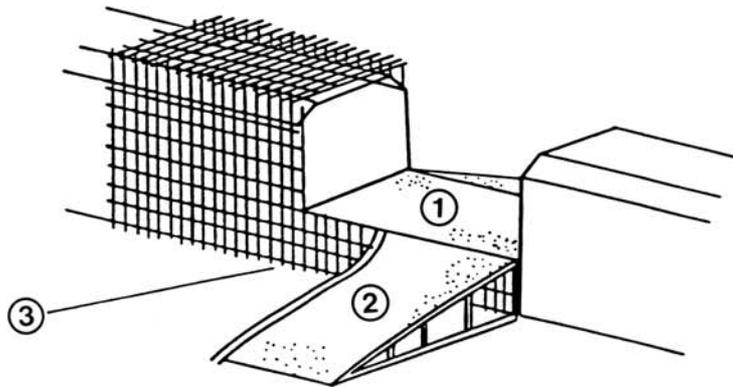


Fig. 22

Overbridge across galleries.
Passage sur des galeries.

- (1) Frame and mount.
- (2) Ramp.
- (3) After removal of ramp.

- (1) *Structure et support.*
- (2) *Rampe.*
- (3) *Après enlèvement de la rampe.*

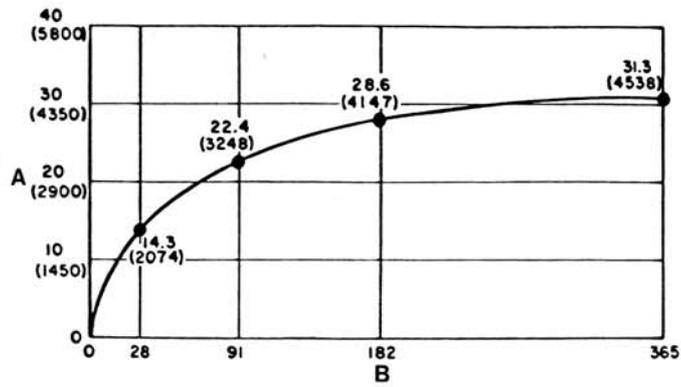


Fig. 23

Long-term strength of RCD concrete
 [C + F = 130 kg/m³ (219 lb/yd³).

Résistance à long terme du béton RCD
(ciment + cendres volantes = 130 kg/m³).

(A) Compressive strength, MPa (lb/in²).

(A) *Résistance à la compression, MPa (lb/in²).*

(B) Age, days.

(B) *Age, jours.*

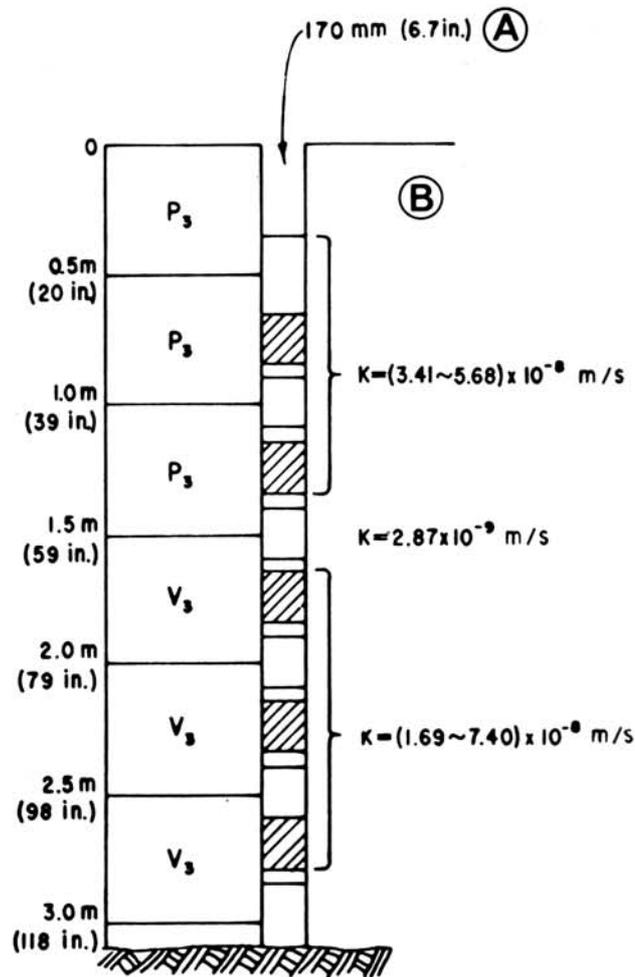


Fig. 24

Results of permeability tests performed
in a borehole at Ohkawa Dam.

*Résultats des essais de perméabilité effectués
dans un forage au barrage Ohkawa.*

(A) Diameter.

(B) Permeability coefficient.

(A) Diamètre.

(B) Coefficient de perméabilité.



Photo 3
Consistency meter [diameter 48 cm (19 in)].
Appareil de mesure de la consistance (diamètre 48 cm).



Photo 4
Concrete discharged from the dump
truck and spread by bulldozers.
*Béton déchargé d'un camion dumper
et étalé par des bulldozers.*



Photo 5

RCD compacted by the self-propelled vibratory roller.
Compactage du béton RCD par un rouleau vibrant automoteur.



Photo 6

Lift joints treatment by motor sweeper.
Traitement des joints de reprise par une balayeuse mécanique.

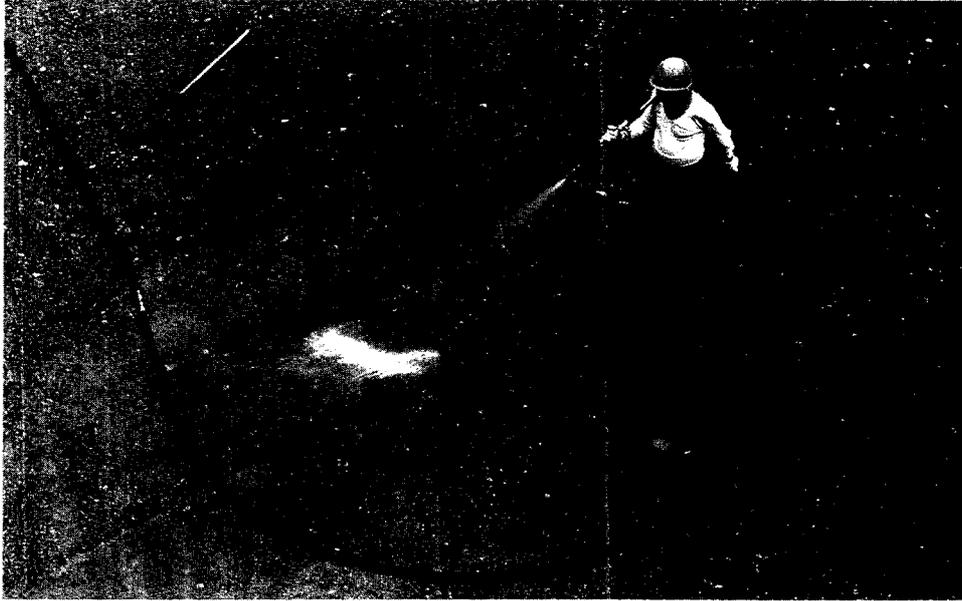


Photo 7

Lift joints treatment by water jet.
Traitement des joints de reprise par jet d'eau.

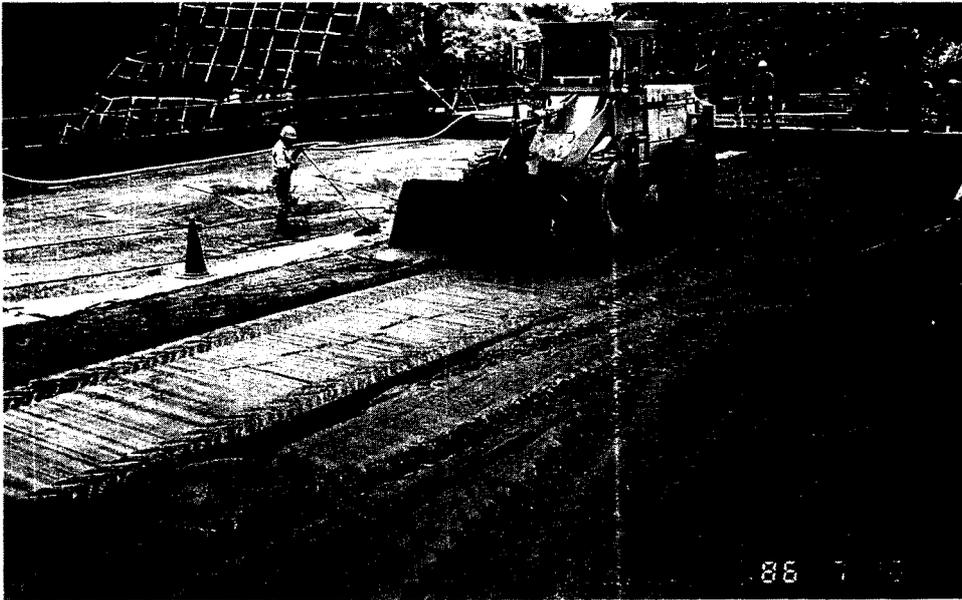


Photo 8

Spreading of mortar on lift joints.
Épandage de mortier sur des joints de reprise.

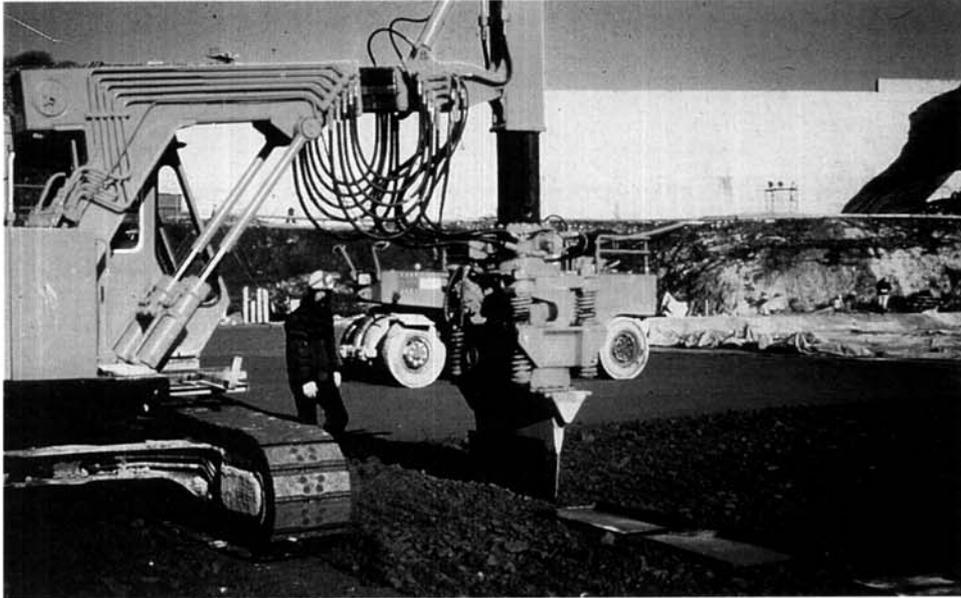


Photo 9

Transverse joints provided by the vibrating blade mounted on joint-cutting machine.

Joints transversaux réalisés par une lame vibrante montée sur une machine à découper les joints.

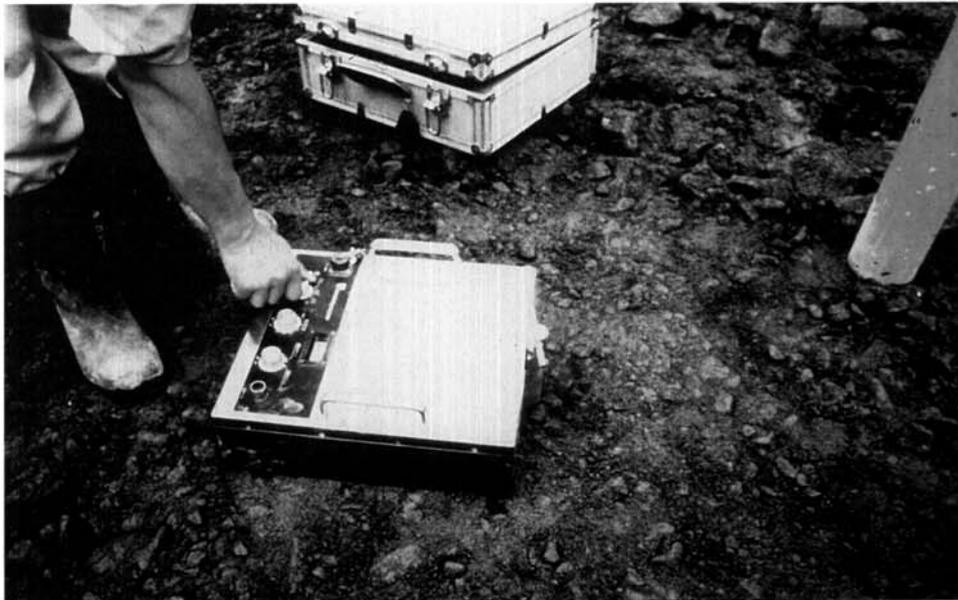


Photo 10

Density test by radioisotope.

Mesure de densité par radio-isotope.



Photo 11

Core drilled from dam body.
Carotte extraite du corps du barrage.



Photo 12

Control of spreading thickness by laser level.
Contrôle de l'épaisseur de béton épandu, au moyen d'un niveau laser.



Photo 13
Test fill.
Planche d'essai.



Photo 14
Shimajigawa dam.
Barrage Shimajigawa.

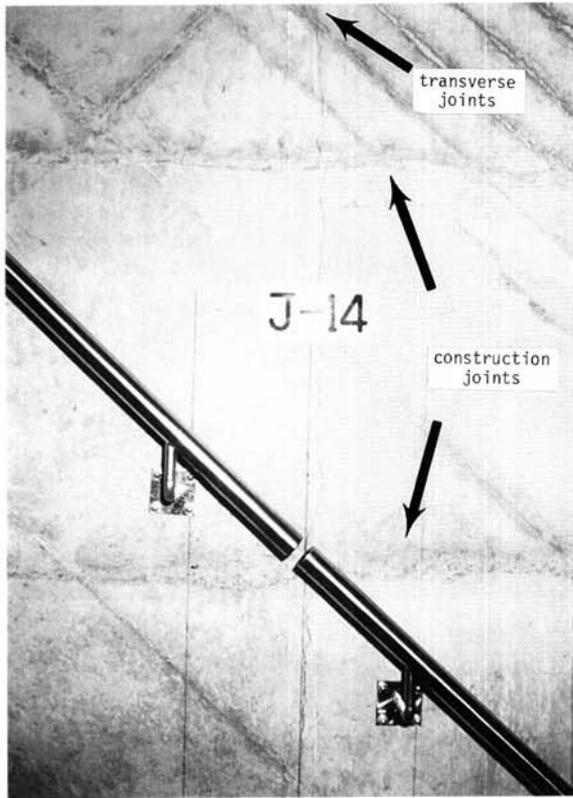


Photo 15

Side wall of inspection gallery
at Shimajigawa Dam.
(There is no leakage
at transverse joints or lift joints).
*Barrage Shimajigawa - Paroi latérale
d'une galerie de visite
(il n'y a pas de fuite sur les joints
transversaux ou les joints de reprise).*

Photo 16

Cores drilled from dam body
(cores were fractured
in lifting operation).
*Carottes extraites du corps du barrage
(les carottes ont été brisées
lors de leur remontée).*



5. REFERENCES

1. ACI Committee 207, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 70, No. 7, July 1973, Fig. 2.1, p. 449.
2. ACI Committee 207, "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 67, No. 4, April 1970, pp. 273-309.
3. ACI Committee 207, "Roller Compacted Concrete", *Manual of Concrete Practice*, Part 1, American Concrete Institute, 1983.
4. ACI Committee 211, "Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (ACI 211.3-75)", American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1975, 18 pp.
5. ADACHI, T., and USUI, K., "Construction of Tamagawa Dam by the RCD Method with a Lift Thickness of 1 m", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 3, No. 4, 1985.
6. ASCE; "Middle Fork RCC Dam", *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, July 1985, pp. 44-45.
7. CANNON, R. W., "Compaction of Mass Concrete with Vibratory Roller", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 71, No. 10, October 1974, pp. 506-513.
8. CANNON, R. W., "Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods", *Economical Construction of Concrete Dams*, American Society of Civil Engineers, New York, 1972, pp. 143-152.
9. CANNON, R. W., "Laboratory Investigations and Full-Scale Trials by the Tennessee Valley Authority", CIRIA Conference on "Rolled Concrete for Dams", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
10. CANNON, R. W., "Proportioning No-Slump Concrete for Expanded Applications", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 4, No. 8, August 1982, pp. 43-47.
11. CERVENI, C., Discussion to Question 43, XIth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Madrid, 1973, Vol. 5, pp. 637-639.
12. CHAO, P. C., and JOHNSON, J. A., "Rollcrete Usage at Tarbela Dam", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 1, No. 11, November 1979, pp. 20-30.
13. CHAO, P. C., "Tarbela Dam-Problems Solved by Novel Concretes", *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, December 1980, pp. 58-64.
14. CRCB, "Record of Shimajigawa Dam Construction", Chugoku Regional Construction Bureau, March 1982.
15. CROW, R. D., DOLEN, T. D., PRUSIA, C. D., and OLIVERSON, J. E., "Mix Design Investigation - Roller Compacted Concrete Construction, Upper Stillwater Dam, Utah", Report No. REC-ERC-84-15, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, June 1984, 72 pp.

16. DAWSON, E. S., " Design of Rolled Concrete Dam for Milton Brook ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
17. DUNSTAN, M. R. H., " Rolled Concrete for Dams - A Laboratory Study of the Properties of High Fly Ash Content Concrete ", CIRIA Technical Note 105, Construction Industry Research and Information Association, London, May 1981a, 96 p.
18. DUNSTAN, M. R. H., " Rolled Concrete for Dams - Construction Trials Using High Fly Ash Content Concrete ", CIRIA Technical Note 106, Construction Industry Research and Information Association, London, May 1981b, 94 p.
19. DUNSTAN, M. R. H., " Trial of Lean Rolled Concrete at the Tamar Treatment Works ", Report to South West Water Authority, June 1977.
20. ELIAS, G. C., CAMPBELL, D. B., and SCHRADER, E. K., " Monksville Dam - A Roller Compacted Concrete Water Supply Structure ", XVth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Lausanne, Switzerland, Vol. II, 1985, pp. 215-238.
21. *Engineering News Record*, " Spreader Box Aids RCC Placement ", July 18, 1985, p. 14.
22. FUJISAWA, T., and NAGAYAMA, I., " Cause and Control of Cracks by Thermal Stress in Concrete Dam ", Q 57, *Transactions*, XVth ICOLD Congress, Lausanne, International Commission on Large Dams, June 1985.
23. GENTILE, G., " Study, Preparation, and Placement of Low Cement Concrete, with Special Regard to its Use in Solid Gravity Dams ", VIIIth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Edinburgh, 1964, Vol. 3, pp. 259-277.
24. HALL, D. J., and HOUGHTON, D. L., " Roller Compacted Concrete Studies at Lost Creek Dam ", US Army Engineer District, Portland, Oregon, June 1974.
25. HARADA, J., and SHIMADA, S., " Measuring of Concrete Temperature at Tamagawa Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 3, No. 2, 1985.
26. HARADA, J., and SHIMADA, Y., " Design and Construction of Tamagawa Dam ", *Journal of JANCOLD*, No. 107, March 1984.
27. HARADA, J., TAKAHASHI, F., and YAMADA, K., " Incline Facilities at Tamagawa Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 3, No. 2, 1985.
28. *Highway and Heavy Construction*, " Membrane-Lined Panels Face New RCC Dam ", February 1985.
29. HIROSE, T., " Experience in the Use of Roller Concrete ", *International Water Power and Dam Construction*, March 1983.
30. HIROSE, T., " Research and Practice Concerning RCD Method ", XIVth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Rio de Janeiro, Vol. 3, C 18, 1982, pp. 1347-1365.
31. HIROSE, T., and TAKEBAYASHI, S., " Present State and Problems of Rationalized Construction of Concrete Dams ", Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers, December 1983.

32. HIROSE, T., and YANAGIDA, T., " Dam Construction in Japan : Burst of Growth Demands Speed, Economy ", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 6, No. 5, May 1984, pp. 14-19.
33. HIROSE, T., and YANAGIDA, T., " Some Experiences Gained in Construction of Shimajigawa and Ohkawa Dams ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
34. HIROSE, T., SHIMIZU, S., and TAKEMURA, K., " Research of the Dam Construction by Roller Compacted Concrete Dam (RCD) Concrete ", *Proceedings*, Japan Society of Civil Engineers, November, No. 303, 1980.
35. HOPMAN, D., KEIFER, O., and ANDERSON, F., " Current Corps of Engineers Concepts for Roller Compacted Concrete Dams ", *Proceedings*, American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985.
36. HUKUOKA, T., YAMASHITA, K., and KOMATSU, A., " Design and Construction of Pirika Dam ", *The Dam Digest*, The Japan Dam Foundation, No. 501, July 1986.
37. ICOLD, " River Control During Dam Construction ", *Bulletin* No. 48, International Commission on Large Dams, Paris, 1984.
38. KOKUBU, M., " Development in Japan of Concrete Dam Construction by the RCD Method ", 52nd ICOLD Executive Meeting, International Commission on Large Dams, Tokyo, June 1984.
39. KOKUBU, M., SHIMIZU, S., and JOJIMA, S., " Present State and Problems of Rationalized Construction of Concrete Dams in Japan ", C7., *Transactions*, 15th ICOLD Congress, Lausanne, International Commission on Large Dams, June 1985.
40. KURITA, Y., OKUMURA, T., and NEGAMI, Y., " Research of Roller Compaction Properties of RCD Concrete ", *Proceedings*, Annual Conference of the Japan Society of 37th Civil Engineers, Part 5, 1982.
41. LA VILLA, G., " The Technique of Placing Rollcrete as Experienced at Tarbela Dam During 1978-1981 for the Construction of Additional Works at the Spillways ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
42. LOWE, J. (III), " Use of Rolled Concrete in Earth Dams ", Discussion to : " Utilization of Soil-Cement as Slope Protection for Earth Dams ", by Holtz, W. G., and Walker, F. C., American Society of Civil Engineers, First Water Resources Engineering Conference, Omaha, Mays 1962.
43. McMILLAN, F. R., and POWERS, T. C., " A Method of Evaluating Admixtures ", *ACI Journal*, American Concrete Institute, March and April 1934.
44. MIZUNO, M., NAGAYAMA, I., and YAZAWA, K., " Thermal and Mechanical Properties of Early Aged Concrete ", *Civil Engineering Journal*, Japan Society of Civil Engineers, 1982, 24-2.
45. MOFFAT, A. I. B., " A Study of Dry Lean Concrete Applied to the Construction of Gravity Dams ", XIth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Madrid, 1973, Vol. 5, pp. 1279-1299.

46. NAGAYAMA, I., " Thermal Stress and Temperature Control in Concrete Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 1, No. 2, 1983.
47. NAGAYAMA, I., and YAMANAKA, T., " Watertightness of the RCD Dam - Monitoring Shimajigawa Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 4, No. 1, 1986.
48. NAGAYAMA, I., and YAZAWA, K., " Thermal Stress Analysis for Concrete Dams ", *Civil Engineering Journal*, Japan Society of Civil Engineers, 1980-7.9.
49. OBERHOLTZER, GARY L., " Galesville Project Materials Engineering for Roller-Compacted Concrete ", Southern Idaho Section, American Society of Civil Engineers, April 1985.
50. OLIVERSON, J. E., and RICHARDSON, A. T., " Upper Stillwater Dam : Design and Construction Concepts ", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 6, No. 5, May 1984, pp. 20-28.
51. PARENT, W. F., MOLER, W. A., and SOUTHARD, R. W., " Construction of Middle Fork Dam ", *Proceedings*, American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985, pp. 71-89.
52. PATON, J., Discussion to Question 39, Xth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Montreal, 1970, Vol. 6.
53. POWERS, T. C., " The Properties of Fresh Concrete ", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.
54. PRICE, A. C., " The Engineering Characteristics of Dry Lean Concrete as Applied to the Construction of Gravity Dams ", Ph. D. Thesis, University of Newcastle-Upon-Tyne, England, 1977.
55. RAGAN, STEVEN A., " Evaluation of Frost Resistance of Roller-Compacted Concrete Pavements ", Session 90, 65th Annual Meeting, Transportation Research Board (accepted for publication), 1986.
56. RAPHAEL, J. M., " The Optimum Gravity Dam ", *Rapid Construction of Concrete Dams*, American Society of Civil Engineers, New York, 1970, pp. 221-247.
57. REEVES, G. N., and YATES, L. B., Jr., " Simplified Design and Construction Control for Roller Compacted Concrete ", *Proceedings*, American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985, pp. 48-61.
58. SATOU, K., and MINAMI, S., " Concrete Dam Construction by the RCD Method-Stillng Basin at Shin-nakano Dam ", *The Dam Digest*, the Japan Dam Foundation, No. 440, June 1981.
59. SAUCIER, KENNETH L., " No-Slump Roller-Compacted Concrete (RCC) for Use in Mass Concrete Construction ", Technical Report SL-84-17, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, October 1984.
60. SCHRADER, E. K., " Willow Creek Dam - An Optimum Gravity RCC Dam with Vertical Upstream Face ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.

61. SCHRADER, E. K., " Compaction of Roller-Compacted Concrete ", Symposium Volume on Consolidation of Concrete, American Concrete Institute, March 1986.
62. SCHRADER, E. K., " Watertightness and Seepage Control in Roller Compacted Concrete Dams ", *Proceedings*, American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985.
63. SCHRADER, E. K., and MCKINNON, R., " Construction of Willow Creek Dam ", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 6, No. 5, May 1984, pp. 38-45.
64. SHIMIZU, S., and TAKEMURA, K., " Design and Construction of a Concrete Gravity Dam on a Weak Bedrock ", XIIIth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, New Delhi, India, 1979, Vol. 1, pp. 519-545.
65. SHIMIZU, S., and TAKEMURA, K., " Test Fill of RCD at the Upstream Cofferdam of Ohkawa Dam ", Japan Concrete Institute, *Concrete Journal*, April 1978.
66. SHIMOMURA, S., and YANAGAWA, J., " Test Fill Works of RCD at Tamagawa Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 1, No. 2, 1983.
67. SUZUKI, N., TANAKA, M., and IWATA, Y., " Construction of the Shimajigawa Dam Rationalized by Using RCD Concrete ", *Civil Engineering Journal*, Japan Society of Civil Engineers, November 1980.
68. TATRO, S. B., and SCHRADER, E. K., " Thermal Considerations for Roller Compacted Concrete ", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 82, No. 2, March-April 1985, pp. 119-128.
69. TCNLD, " Dam Construction Method by RCD Method ", Technology Center for National Land Development, July 1981a.
70. TCNLD, « Technical Guide for RCD Construction Method ", Technology Center for National Land Development, July 1981b.
71. TERZAGHI, K., and PECK, R., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967, pp. 15 and 84.
72. THOMAS, D. A., " Artificial Bedrock for Outlet Structure ", Reprint of article by Portland Cement Association - Pacific South West Region Office, Los Angeles, California, 1968.
73. TYNES, W. O., " Feasibility Study of No-Slump Concrete for Mass Concrete Construction ", *Miscellaneous Paper No. C-73-10*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, October 1973.
74. US Army Corps of Engineers, " Concrete Report - Willow Creek Dam ", Walla Walla District, Walla Walla, Washington, August 1984, Chapter 5, p. 17.
75. US Army Corps of Engineers, " Roller-Compacted Concrete ", Engineer Manual 1110-2-2006, Office, Chief of Engineers, Washington, D.C., 1985, 95 p.
76. US Bureau of Reclamation, *Design of Gravity Dams*, Denver, Colorado, 1976, 553 p.
77. WU, T. H., *Soil Mechanics*, Allyn and Bacon, Inc., Boston, Massachusetts, 1967, p. 93.

78. YAMAUCHI, T., HARADA, J., OKADA, T., and SHIMADA, S., « Construction of Tamagawa Dam by the RCD Method », XVth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Lausanne, Switzerland, Vol. II, 1985, pp. 89-116.
79. YANAGAWA, J., and INADA, S., « Temperature Control at Tamagawa Dam », *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 1, No. 4, 1983.

ADDITIONAL RESOURCE MATERIAL

AUTRES RÉFÉRENCES

80. ACI Committee 308, « Recommended Practice for Curing Concrete (ACI 308-71) (Reaffirmed 1978) », American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1971, p. 11.
81. *Alaska Construction and Oil*, « A First in Alaska - Roller Compacted Concrete », November 1978, pp. 30-32.
82. AOYAGI, I., SUGAWARA, K., KURITA, Y., and KANAMORI, Y., « Research of Flyash Application to Roller Compacted Concrete », *Proceedings*, Annual Conference of the Japan Society of Concrete Engineers, Part 6, 1984.
83. BUSH, E. G. W., « Rollcrete in Revelstoke Cofferdam », CIRIA Conference on « Rolled Concrete for Dams », Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
84. CHOUDRY, T., BOGDOWITZ, W., and CHAVARRI, G., « Construction of Cofferdam at Guri with Rollcrete », XVth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Rio de Janeiro, Brazil, 1982, Vol. 4, pp. 69-84.
85. DRUYTS, F., « Concrete Placing Tests at Elandspruit Dam », Department of Water Affairs, Pretoria, South Africa, December 1979.
86. HANSEN, K., « Roller Compacted Concrete, Water Control Applications in the US and Canada », Portland Cement Association, Denver, Colorado, July 1979.
87. HILF, J. W., « Rolled Concrete Dams Using Gap-Graded Aggregate », *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 113, No. 1, March 1987, pp. 27-33.
88. HOUGHTON, D. L., « Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete ». *ACI Journal*, *Proceedings*, Vol. 73, No. 12, December 1976, pp. 691-700.
89. HOUK, Ivan E. Jr., PAXTON, James A., and HOUGHTON, Donald L., « Prediction of Thermal Stress and Strain Capacity of Concrete by Tests of Small Beams », *ACI Journal*, *Proceedings*, Vol. 67, No. 3, March 1970, pp. 253-261.
90. HOUK, Ivan E. Jr., BORGE, Orville E., and HOUGHTON, Donald L., « Studies of Autogenous Volume Change in Concrete for Dworshak Dam », *ACI Journal Proceedings*, Vol. 66, No. 7, July 1969, pp. 560-568.
91. JINBO, A., and KOMATSU, A., « The Experimental Concrete Placement by RCD Method in Pirika Dam », *Concrete Journal*, Japan Concrete Institute, Vol. 21, No. 8, 1984.

92. KARL, D., " Upper Stillwater Dam RCC Construction Program ", *Proceedings American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985, pp. 102-110.*
93. KRAUCH, H. W., " Rolled Lean Concrete at Itaipu Dam ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
94. KURITA, Y., OKUMURA, T., ONO, J., and SHIMADA, Y., " Research of RCD Concrete Compaction Properties, Reports of the Research Institute of Shimizu Construction Co. Ltd., August, No. 38.
95. LOGIE, C.V., " Economic Considerations in Selection of a Roller Compacted Concrete Dam ", *Proceedings, American Society of Civil Engineers, Symposium on Roller Compacted Concrete, ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1-2, 1985, pp. 111-122.*
96. MASS, G. R., " Roller Compacted Concrete Provides Economical Solutions for Dam Constructions ", *Concrete, July 1983, pp. 32-35.*
97. MAYNARD, D. P., " Properties of Cores from Full-Scale Trials ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
98. MIURA, Y., and KODERA, Y., " First-stage Cofferdam Construction by RCD Method ", *Engineering for Dams, Japan Dam Engineering Center, Vol. 1, No. 4, 1983.*
99. MURATA T., FURUYA, M., and MINAMI, K., " Designing and Constructing of Raising Dam - Construction of Shin-nakano Dam ", *Journal of Japan Society of Civil Engineers, June 1983.*
100. NAGAYAMA, I., and YAMANAKA, T., " Diaphragm of the RCD Dam - Shimajigawa Dam's Records ". *Engineering for Dams, Japan Dam Engineering Center, Vol. 4, No. 1, 1986.*
101. National Research Center for Civil Engineering Development Report on the Rationalisation of Concrete Dam Construction.
102. *New Civil Engineer*, " Rollcrete Dam Near to Completion ", London, February 18, 1982, p. 6.
103. NUSSBAUM, P. J., and COLLEY, B. E., " Dam Construction and Facing with Soil-Cement " (RD 010-01.W), Portland Cement Association, 1971.
104. OKADA, K., " Research of Super-stiff Concrete in Lean Mix Proportion of Blast-furnace Slag and Blast-furnace Cement ", The Society of Materials Science, Japan, March 1986.
105. OKUMURA, T., ., " Research and Development of RCD Concrete Construction Method by the Using of 150 mm Maximum Size Coarse Aggregate ", Reports of the Research Institute of Shimizu Construction Co. Ltd., August, No. 36.
106. POLIVKA, Milos, PIRTZ, David, and ADAMS, Robert F., " Studies of Creep in Mass Concrete ", Symposium on Mass Concrete, SP-6, American Concrete Institute, Detroit, 1963, pp. 257-285.
107. Portland Cement Association, " Soil-Cement Slope Protection for Earth Dams : Planning and Design ", Publication No. IS173.01 W, 1971, p. 11.

108. SAUCIER, K. L., " Investigation of No-slump Roller Compacted Concrete (RCC) for use in Mass Concrete Construction ", CIRIA Conference on " Rolled Concrete for Dams ", Construction Industry Research and Information Association, London, June 1981.
109. SCHRADER, E. K., " The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods ", *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 4, No. 10, October 1982, pp. 15-24.
110. SHIMIZU Construction Co., Ltd., " Studies on RCD Concrete ", Japan Society of Civil Engineers, October 1981.
111. SIMAKOV, G. K., " Shear Characteristics of Horizontal Joints in Rolled Concrete Dams ", *Izvestia VNIIG imeni B. E. Vedeneeva. Sbornik nauchnykh trudov*, 1985, Vol. 177, pp. 34-37, 2 ill., bibl. 4 refs.
112. SUDAKOV, V. B., KARTELEVA M. A., GINZBURG S. M., SUKHANKIN G. L., KURAKINA E. V., GREBENSHCHIKOV Yu. S., SHANGIN V. S., *Erection Techniques for the Rolled Concrete Gravity Dam of the Tashkumyrskaya Hydro Power Plant*, *Izvestia VNIIG imeni B. E. Vedeneeva. Sbornik nauchnykh trudov*, 1985, Vol. 177, pp. 22-33, 5 ill., bibl. 15 refs.
113. TAKAHATA, H., " Automatic Concrete Conveyance System at Mano Dam ", *Engineering for Dams*, Japan Dam Engineering Center, Vol. 3, No. 4, 1985.
114. TANAKA, M., SUZUKI, A., SAKAMOTO, M., and YUDASAKA, M., " The Dynamic Behavior of Double-Mixed Fresh Lean Mortar ", *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1983.
115. TIDA, K., HORIGOME, S., SAKURAI, H., and SUQAWANA, T., " Vibrating Compaction Properties of Double Mixed Roller Compacted Concrete ", *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1983.
116. US Army Corps of Engineers, " Concrete Report - Willow Creek Dam, World's First All Roller Compacted Concrete Dam ", Walla Walla District, Walla Walla, Washington, July 1983.
117. US Bureau of Reclamation, " Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams ", *Engineering Monograph No. 19*, Denver, Colorado, 1974.
118. WALLINGFORD, V. M., " Proposed New Technique for Construction of Concrete Gravity Dams ", Xth ICOLD Congress, International Commission on Large Dams, Montreal, 1979, Vol. 4, pp. 439-452.
119. WILLIAMS, R.I.T., " The Effect of Cement Content on the Strength and Elastic Properties of Dry Lean Concrete ", *Cement and Concrete Association*, London, 1962.
120. WILLIAMS, R. I. T., and PATANKAR, V. D., " The Effect of Cement Type, Aggregate Type, and Mix Water Content on the Properties of Lean Concrete Mixes ", *Cement and Concrete Association*, London, 1968.

LATE REFERENCES
RÉFÉRENCES RÉCENTES

121. ARJOUAN, M., CHRAIBI, A. F., and EJJAOUANI, H., « Utilisation du Béton Compacté au Rouleau dans les barrages de faible importance : Cas du Barrage de Rwedat », Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 635-651.
122. BAYAN, B. J., " Execution and Control of the Castilblanco De Los Arroyos Dam With Roller Compacted Concrete ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 559-574.
123. BENCHEIKH, L., TAYAE, M., JAFRANE, S., and LAHLOU, K., « Barrage Ain Al Koreima en Béton Compacté au Rouleau, à base d'alluvions naturelles. Conception et Composition du béton », Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 613-633.
124. BOUYGE, B., GARNIER, G., JENSEN, A., MARTIN, J. P., and STERENBERG, J., « Construction et contrôle d'un barrage en Béton Compacté au Rouleau (BCR) : Un travail d'équipe », Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 589-612.
125. DOLEN, T. P., and RICHARDSON, A. T., " Slipformed Concrete Facing for Roller Compacted Concrete Dams ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 397-416.
126. DUNSTAN, M. H. R., " Design and Construction Considerations for Roller Compacted Concrete Dams", Sixteenth ICOLD Congress, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 453-467.
127. FORBES, B. A., " The Development and Testing of Roller Compacted Concrete for Dams in Australia ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 89-117.
128. GUZINA, B. J., UZELAC, S., SARIC, M., " Application of Roller Compacted Concrete at Appurtenant Hydraulic Structures of a Large Dam ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 515-533.
129. HIROSE, T., NAGAYAMA, I., TAKEMURA, K., and SATO, H., " A Study on Control of Temperature Cracks in Large Roller Compacted Concrete Dams ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 119-135.
130. HOLLINGWORTH, F., DRUYTS, F. H. W. M., and MAARTENS, W. W., " Some South African Experiences in the Design and Construction of Rollcrete Dams ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 33-51.
131. IMAMURA, M., TORII, K., and HARADA, J., " Embedded Facilities within the RCD Dam Bodies ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 161-184.

132. LAMA, J. L., PEREZ DE JUAN, I., and BENET, J., " The Santa Eugenia Dam : Use of Roller Compacted Concrete ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 697-713.
133. WANG, S., " Kengkou Roller Compacted Concrete Dam ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 689-696.
134. Working Group of the Universidad De Cantabria and the Direccion General De Obras Hidraulicas, " Comments on Roller Compacted Concrete ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 739-748.
135. YAMAGUCHI, J., OHYABU, K., KATO, T., and KAMATA, T., " Construction Work and Quality and Temperature Control for Tamagawa RCD Dam ", Sixteenth ICOLD Congress on Large Dams, *Proceedings*, Vol. III, Question 62, June 1988, pp. 137-159.

APPENDIX / ANNEXE
TABLES A, B, C / TABLEAUX A, B, C

LISTE D'OUVRAGES BCR ET RCD
A - BARRAGES-POIDS

N°	Année d'achév.	Nom du barrage	Pays/État	Maître d'ouvrage/ Maître d'œuvre	Hauteur max. (m)	Volume de BCR/RCD (m³)	C + CV (kg/m³)	Parement amont Parement aval
1	1980	Shimajigawa	Japon Yamaguchi	MCJG	89	317 000 (total RCD + tradi.)	91 + 39	— 3,0 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
2	1982	Shin-nakano	Japon Hokkaido	Hokkaido DA	75	13 000	84 + 36	— Bassin d'amortissement
3	1982	Willow Creek	USA Oregon	Corps of Engineers Walla Walla, WA	52	331 000	70 + 23 (moy.)	— Panneaux béton préfabriqués — 0,8/1 non coffré
4	1984	Ohkawa	Japon Fukushima	Fukushima LG	75	300 000	96 + 24	— Couche d'assise
5	1984	Winchester	USA Kentucky	Winchester Mun. Utilities Parrott, Ely & Hurt + Palmer	21	24 500	104 + 0	— Panneaux béton préfabriqués + membrane + béton tradi. — 1,0/1 non coffré avec évacuateur en béton tradi.
6	1984	Middle Fork	USA Colorado	Exxon Co. USA Morrison-Knudsen Engr.	38	42 100	66 + 0	— 3,0 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi. en escalier
7	1984	Kidston	Australie Queensland	Kidstone Gold Mine Gutteridge Haskins & Davey	40	138 000	95 + 15 (moy.)	— Couches de BCR avec liaison 0,8 à 0,9/1 non coffré avec évacuateur en béton
8	1985	Galesville	USA Oregon	Douglas County Morrison-Knudsen Engr.	51	160 800	54 + 52 (moy.)	— Béton tradi. : (0,3-0,1 m) — 0,8/1 non coffré
9	1986	Monksville	USA New Jersey	No. Jersey Dist. Water Supply + Hackensack Water Co. O'Brien & Gere	46	221 000	64 + 0	— 3,0 m mini. de béton tradi. — 0,78/1 béton tradi. avec marches d'escalier pour l'évacuateur
10	1986	Grindstone	USA New Mexico	Village of Ruidoso Boyle Engineering	42	87 500	74 + 30	— Béton tradi. — 0,75/1 béton tradi.
11	1986	Zaaihoek	Afrique du Sud Natal	Dept. of Water Affairs	50	120 000	31,5 + 73,5	— 0,6 m béton tradi. — 0,62/1 béton tradi.
12	1986	Saco	Brésil Paraíba	State of Paraíba Icoplan	57	130 000	65 + 0	— 3,0 m mini. béton tradi. — 0,8/1 non coffré
13	1986	Verzea Grande	Brésil Paraíba	State of Paraíba Icoplan	33	30 000	75 + 0	— 0,3 m mini. béton tradi. — 0,8/1 non coffré

LIST OF RCC AND RCD APPLICATIONS
A - GRAVITY DAMS

No.	Completed	Name of Dam	Country/ State	Owner/Engineer	Max. Height m (ft)	RCC/RCD Volume m ³ (yd ³)	C + FA kg/m ³ (lb/yd ³)	Upstream Face Downstream Face
1	1980	Shimajigawa	Japan Yamaguchi	MCJG	89 (292)	317 000 (415 000) total RCD + conv.	91 + 39 (153 + 66)	— 3.0 m conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
2	1982	Shin-nakano	Japan Hokkaido	Hokkaido DA	75 (246)	13 000 (17 000)	84 + 36 (141 + 61)	(Note) Stilling Basin
3	1982	Willow Creek	USA Oregon	Corps of Engineers Walla Walla, WA	52 (169)	331 000 (433 000)	70 + 23 (118 + 39) aver.	p/c conc. panels — 0.8 : 1 unformed
4	1984	Ohkawa	Japan Fukushima	Fukushima LG	75 (256)	300 000 (392 000)	96 + 24 (162 + 40)	(Note) Base mat
5	1984	Winchester	USA Kentucky	Winchester Mun. Utilities Parrott, Ely & Hurt + Palmer	21 (70)	24 500 (32 000)	104 + 0 (175 + 0)	p/c conc. panels w/membrane + conv. concrete — 1.0 : 1 unformed w/conv. conc. spillway
6	1984	Middle Fork	USA Colorado	Exxon Co. USA Morrison-Knudsen Engr.	38 (124)	42 100 (55 000)	66 + 0 (112 + 0)	— 3.0 m conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc. stepped
7	1984	Kidston	Australia Queensland	Kidstone Gold Mine Gutteridge Haskins & Davey	40 (131)	138 000 (180 000)	95 + 15 (150 + 25) aver.	RCC-bonded layers — 0.8 to 0.9 : 1 unformed w/conc. spillway
8	1985	Galesville	USA Oregon	Douglas County Morrison-Knudsen Engr.	51 (167)	160 800 (210 300)	54 + 52 (91 + 87) aver.	— conv. conc. (0.3-0.1 m) — 0.8 : 1 unformed
9	1986	Monksville	USA New Jersey	No. Jersey Dist. Water Supply + Hackensack Water Co. O'Brien & Gere	46 (150)	221 000 (289 000)	64 + 0 (108 + 0)	— 3.0 m min. conv. conc. — 0.78 : 1 conv. conc./stepped in spillway
10	1986	Grindstone	USA New Mexico	Village of Ruidoso Boyle Engineering	42 (139)	87 500 (114 500)	74 + 30 (125 + 50)	— conv. conc. — 0.75 : 1 conv. conc.
11	1986	Zaaihoek	South Africa Natal	Dept. of Water Affairs	50 (164)	120 000 (157 000)	31.5 + 73.5 (53 + 124)	— 0.6 m conv. conc. — 0.62 : 1 conv. conc.
12	1986	Saco	Brazil Paraiba	State of Paraiba Icoplan	57 (187)	130 000 (170 000)	65 + 0 (109.4 + 0)	— 3.0 m min. conv. conc. — 0.8 : 1 unformed
13	1986	Verzea Grande	Brazil Paraiba	State of Paraiba Icoplan	33 (108)	30 000 (39 200)	75 + 0 (126 + 0)	— 0.3 m min. conv. conc. — 0.8 : 1 unformed

LISTE D'OUVRAGES BCR ET RCD (Suite)

A - BARRAGES-POIDS

N°	Année d'achév.	Nom du barrage	Pays/État	Maitre d'ouvrage/ Maitre d'œuvre	Hauteur max. (m)	Volume de BCR/RCD (m³)	C + CV (kg/m³)	Parement amont Parement aval
14	1986	Kengkou	R.P. de Chine		57	43 800		— Membrane mortier-bitume + dalles en béton préfabriquées — 1/0.75 dalles en béton préfabriquées
15	1987	Tamagawa	Japon Akita	MCJG	103	1 150 000 (total RCD + tradi.)	91 + 39	— 3,0 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
16	1987	Upper Stillwater	USA Utah	Bureau of Reclamation Bureau of Reclamation	87	1 070 000	77 + 171	— Béton tradi. avec éléments coff. glissant — 0,60 m béton tradi. avec coff. glissant + marches d'escalier
17	1987	Acaua	Brésil Para	Icoplan	80	765 000		
18	1988	Elk Creek	USA Oregon	Corps of Engineers Portland	76	795 000	70 + 33	— Béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
19	1988	Pirika	Japon Hokkaido	Hokkaido DA	40	360 000 (total RCD + tradi.)	84 + 36	— 1,5 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
20	1988	Urugua-i	Argentine Misiones	Electricidad Misiones SA	75	610 000	60 + 0	— Béton préfa. + membrane ou béton tradi.
21	1988	Arabie	Afrique du Sud Lebowa	Dept. of Coop. Development Theron, Prinsloo & Van Tonder	35	110 000	36 + 74	— 0,8/1 non coffré avec évacuateur en béton tradi.
22	1988	Mano	Japon Fukushima	Fukushima LG	69	212 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	— 3,0 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
23	1989	Asahi Ogawa	Japon Toyama	Toyama LG	84	354 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	
24	1992	Sakaigawa	Japon Toyama	Toyama LG	115	633 000 (total RCD + tradi.)	84 + 36	— 3,0 m béton tradi. — 0,78/1 béton tradi.
25	1990	Shiromizugawa	Japon Yamagata	Yamagata LG	54,5	315 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	— 3,0 m béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
26	C	Dodairagawa	Japon Gunma	Gunma LG	70	380 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	

LIST OF RCC AND RCD APPLICATIONS (continued)

A - GRAVITY DAMS

No.	Com- pleted	Name of Dam	Country/ State	Owner/Engineer	Max. Height m (ft)	RCC/RCD Volume m ³ (yd ³)	C + FA kg/m ³ (lb./yd ³)	Upstream Face Downstream Face
14	1986	Kengkou	P.R. of China		57 (187)	43 800 (57 200)		— asphalt-mortar membrane + precast concrete slab — 1 : 0.75 precast concrete slab
15	1987	Tamagawa	Japan Akita	MCIG	103 (338)	1 150 000 (1 375 000) total RCD + conv.	91 + 39 (153 + 66)	— 3.0 m. conv. conc. — 0.81 : 1 conv. conc.
16	1987	Upper Stillwater	USA Utah	Bureau of Reclamation Bureau of Reclamation	87 (285)	1 070 000 (1 400 000)	77 + 171 (129 + 289)	— conv. conc. slipform elements — 0.60 m. conv. conc. — slipformed & stepped
17	1987	Acaua	Brazil Para	Icoplan	80 (262)	765 000 (1 000 000)		
18	1988	Elk Creek	USA Oregon	Corps of Engineers Portland	76 (249)	795 000 (1 040 800)	70 + 33 (118 + 56)	— conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
19	1988	Pirika	Japan Hokkaido	Hokkaido DA	40 (131)	360 000 (471 000) total RCD + conv.	84 + 36 (142 + 61)	— 1.5 m conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
20	1988	Urugua-i	Argentina Misiones	Electricidad Misiones SA	75 (260)	610 000 (798 000)	60 + 0 (101 + 0)	— p/c conc. + membrane or conv. conc.
21	1988	Arabie	South Africa Lebowa	Dept. of Coop. Development Theron, Prinsloo & Van Tonder	35 (115)	110 000 (144 000)	36 + 74 (60.7 + 124.7)	— 0.8 : 1 unformed with conv. conc. spillway
22	1988	Mano	Japan Fukushima	Fukushima LG	69 (226)	212 000 (278 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	— 3.0 m conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
23	1989	Asahi Ogawa	Japan Toyama	Toyama LG	84 (276)	354 000 (463 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	
24	1992	Sakaigawa	Japan Toyama	Toyama LG	115 (377)	633 000 (828 000) total RCD + conv.	84 + 36 (142 + 61)	— 3.0 m conv. conc. — 0.78 : 1 conv. conc.
25	1990	Shiromizugawa	Japan Yamagata	Yamagata LG	54.5 (179)	315 000 (412 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	— 3.0 m conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
26	UC	Dodairagawa	Japan Gunma	Gunma LG	70 (229)	380 000 (497 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	

LISTE D'OUVRAGES BCR ET RCD (Suite)
A - BARRAGES-POIDS

N°	Année d'achév.	Nom du barrage	Pays/État	Maître d'ouvrage/ Maître d'œuvre	Hauteur max. (m)	Volume de BCR/RCD (m³)	C + CV (kg/m³)	Parement amont Parement aval
27	C	Nunome	Japon Nara	WRDPC	72	370 000 (total RCD + tradi.)	85.5 + 45.5	
28	C	Asari	Japon Hokkaido	Hokkaido LG	72	500 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	
29	C	Kamuro	Japon Yamagata	Yamagata LG	61	298 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	
30	P	Kodama	Japon Fukushima	Fukushima LG	102	662 000 (total RCD + tradi.)	96 + 24	
31	P	Gassan	Japon Yamagata	MCJG	125	1 450 000 (total RCD + tradi.)	—	
32	P	Hattabana	Japon Hiroshima	MCJG	85	650 000 (total RCD + tradi.)	—	
33	P	Miyagase	Japon Kanagawa	MCJG	155	2 200 000 (total RCD + tradi.)	—	
34	P	Pamo	USA Californie	San Diego Co. Water Dist. Dames & Moore	80	375 400	—	— Béton tradi. — 0,7/1 béton tradi.
35	P	Lake Robertson	Canada Québec	Hydro Quebec Lemieux, Roy & Assoc.	39	32 000	—	— 0,45 m béton tradi.
36	P	Stagecoach	USA Colorado	Upper Yampa Water Cons. Dist. Woodward Clyde Cons.	44	45 900	—	— Béton tradi. — 0,8/1 béton tradi.
37	1987	Les Olivettes	France Département de l'Hérault	Compagnie Nationale du Bas-Rhône Languedoc	36	85 000	130	— Béton tradi. coffré — BCR sauf béton tradi. pour l'évacuateur de crue en escalier
38	1986	DeMist-Kraal	Afrique du Sud	Cape Depart. of Water Affairs	30	65 000	58 + 58	— 0,60 m béton tradi. — 0,6/1 béton tradi.

DA = Agence de Développement
LG = Gouvernement Local

MCJG = Ministère de la Construction, Gouvernement Japonais

C = En construction
P = En projet - Offres non remises
WRDPC = Service Public de Mise en Valeur des Ressources en Eau

C = Ciment
CV = Cendres volantes

LIST OF RCC AND RCD APPLICATIONS (continued)

A - GRAVITY DAMS

No.	Com- pleted	Name of Dam	Country/ State	Owner/Engineer	Max. Height m (ft)	RCC/RCD Volume m ³ (yd ³)	C + FA kg/m ³ (lb/yd ³)	Upstream Face Downstream Face
27	UC	Nunome	Japan Nara	WRDPC	72 (236)	370 000 (484 000) total RCD + conv.	85.5 + 45.5 (142 + 77)	
28	UC	Asari	Japan Hokkaido	Hokkaido LG	72 (236)	500 000 (654 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	
29	UC	Kamuro	Japan Yamagata	Yamagata LG	61 (200)	298 000 (390 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	
30	UD	Kodama	Japan Fukushima	Fukushima LG	102 (335)	662 000 (866 000) total RCD + conv.	96 + 24 (162 + 40)	
31	UD	Gassan	Japan Yamagata	MCJG	125 (401)	1 450 000 (1 897 000) total RCD + conv.	—	
32	UD	Hattabana	Japan Hiroshima	MCJG	85 (279)	650 000 (850 000) total RCD + conv.	—	
33	UD	Miyagase	Japan Kanagawa	MCJG	155 (509)	2 200 000 (2 878 000) total RCD + conv.	—	
34	UD	Pamo	USA California	San Diego Co. Water Dist. Dames & Moore	80 (264)	375 400 (491 000)	—	— conv. conc. — 0.7 : 1 conv. conc.
35	UD	Lake Robertson	Canada Quebec	Hydro Quebec Lemieux, Roy & Assoc.	39 (128)	32 000 (41 500)	—	— 0.45 m conv. conc.
36	UD	Stagecoach	USA Colorado	Upper Yampa Water Cons. Dist Woodward Clyde Cons.	44 (145)	45 900 (60 000)	—	— conv. conc. — 0.8 : 1 conv. conc.
37	1987	Les Olivettes	France Département de l'Hérault	Compagnie Nationale du Bas-Rhône Languedoc	36 (118)	85 000 (111 200)	130 (219)	— conv. formed conc. — RCC except conv. conc. for stepped spillway
38	1986	DeMist Kraal	South Africa	Cape Dept. of Water Affairs	30 (98)	65 000 (85 000)	58 + 58 (98 + 98)	— 0.6 m conv. conc. — 0.6 : 1 conv. conc.

DA = Development Agency
 LG = Local Government
 MCJG = Ministry of Construction, Japanese Government

UC = Under Construction
 UD = Under Design = Not bid as yet
 WRDPC = Water Resource Development Public Corporation

C = Cement
 FA = Fly Ash

LISTE D'OUVRAGES BCR
B - SECTIONS DÉVERSANTES ET ÉVACUATEURS DE CRUE

N°	Année d'achév.	Nom du barrage	Pays/État	Maitre d'ouvrage/ Maitre d'œuvre	Volume de BCR (m³)	C + CV (kg/m³)	Application
1	1978	Chena Proj. Évacuateur de crue	USA Alaska	Corps of Engineers CofE - Anchorage AK	12 800	178 + 0	Seuil de l'évacuateur 1,5 m de hauteur
2	1980	Ocoee #2 Rénovation du barrage	USA Tennessee	Tennessee Valley Authority	3 400		Talus aval du vieux barrage en charpente de bois et enrochement
3	1980	Toutle River Ouvrage de correction de torrent	USA Washington	Corps of Engineers CofE-Portland, OR	13 800	297 + 0	Évacuateur de crue sur remblai
4	1980	Shin-Nakano Surélévation du barrage	Japon Hokkaido	Ministry of Construction	13 000	84 + 36	Bassin d'amortissement
5	1982	Barrage de Tarbela	Pakistan	Pakistan Water & Power Dev. Auth. Tippett-Abett-McCarthy-Stratton	2 300 000	148 + 0 (moy.)	Stabilisation des bassins d'amortissement des évacuateurs principal et auxiliaire
6	1984	Dolet Hills Barrage hydro-élec.	USA Louisiane	Southwestern Electric Power Co. Freese and Nichols	19 970	208 + 104	Section de l'évacuateur de crue 11 m de hauteur
7	1985	Kerrville Rénovation du barrage	USA Texas	Upper Guadalupe River Authority Espey-Huston & Assoc.	16 800	119 + 0	Section poids aval 6,4 m de hauteur
8	1986	DeMist-Kraal Seuil	Afrique du Sud Cape	Dept. of Water Affairs	60 000	58,5 + 58,5	Section de l'évacuateur de crue 30 m de hauteur
9	1986	Cedar Falls Digue déversante	USA Washington	Seattle City Light RW Beck & Associates	3 820	131 + 89	Digue déversante 10,4 m de hauteur
10	1986	Harrison Lake Rénovation du barrage	USA Virginie	US Fish & Wildlife Service Geotechnical Engineers, Inc.	4 510	142 + 0	Protection du remblai aval
11	1986	Trout Lake Rénovation du barrage	USA N. Caroline	US National Park Service Geotechnical Engineers, Inc.	2 600	171,5 + 0	Protection du remblai aval
12	1987	Price Lake Rénovation du barrage	USA N. Caroline	US National Park Service Geotechnical Engineers, Inc.	3 980	171,5 + 0	Remblai aval

LIST OF RCC APPLICATIONS
B - OVERFLOW SECTIONS AND SPILLWAYS

No.	Com- pleted	Name of Dam	Country/ State	Owner/Engineer	RCC Volume m ³ (yd ³)	C + FA kg/m ³ (lb./yd ³)	Application
1	1978	Chena Proj. Floodway	USA Alaska	Corps of Engineers CofE = Anchorage AK	12 800 (16 700)	178 + 0 (300 + 0)	1.5 (5 ft) high Floodway sill
2	1980	Ocoee Dam # 2-rehab	USA Tennessee	Tennessee Valley Authority Tennessee Valley Authority	3 400 (4 450)		Downstream slope old wood crib & rock dam
3	1980	Toutle River Debris Structure	USA Washington	Corps of Engineers CofE-Portland, OR	13 800 (18 000)	297 + 0 (500 + 0)	Overflow spillway on em- bankment
4	1980	Shin-Nakano Dam Raising	Japan Hokkaido	Ministry of Construction	13 000 (17 000)	84 + 36 (142 + 61)	Stilling basin
5	1982	Tarbela Dam	Pakistan	Pakistan Water & Power Dev. Au- thority Tippett-Abbott-McCarthy-Straaton	2 300 000 (3 000 000)	148 + 0 aver. (250 + 0)	Stabilization of service & auxiliary spillway plunge pools
6	1984	Dolet Hills Powerplant Dam	USA Louisiana	Southwestern Electric Power Co. Freese and Nichols	19 970 (26 120)	208 + 104 (350 + 175)	11 m (35 ft) high spillway section
7	1985	Kerrville Ponding Dam Rehab.	USA Texas	Upper Guadalupe River Authority Espy-Huston & Assoc.	16 800 (22 000)	119 + 0 (200 + 0) aver.	6.4 m (21 ft) high down- stream gravity section
8	1986	DeMist-Kraal Weir	South Africa Cape	Dept. of Water Affairs	60 000 (78 500)	58.5 + 58.5 (99 + 99)	30 m (98 ft) high spillway section
9	1986	Cedar Falls Overflow Dike	USA Washington	Seattle City Light R. W. Beck & Associates	3 820 (5 000)	131 + 89 (220 + 150)	10.4 m (34 ft) high over- flow dike
10	1986	Harrison Lake Dam-Rehab	USA Virginia	U.S. Fish & Wildlife Service Geotechnical Engineers, Inc.	4 510 (5 900)	142 + 0 or = (240 + 0) (185 + 70)	Downstream embankment protection
11	1986	Trout Lake Dam-Rehab	USA N. Carolina	US National Park Service Geotechnical Engineers, Inc.	2 600 (3 400)	171.5 + 0 or = (289 + 0) (216 + 142)	Downstream embankment protection
12	1987	Price Lake Dam-Rehab	USA N. Carolina	US National Park Service Geotechnical Engineers, Inc.	3 980 (5 200)	171.5 + 0 or = (289 + 0) (216 + 142)	Downstream embankment

LISTE D'OUVRAGES BCR (Suite)
C - DIVERSES APPLICATIONS SUR DES BARRAGES

N°	Année d'achév.	Nom du barrage	Pays/État	Maître d'ouvrage/ Maître d'œuvre	Volume de BCR (m ³)	C + CV (kg/m ³)	Application
1	1960	Shihmen	Taiwan	Tippett-Abbott-McCarthy-Stratton		158 + 79	Noyau pour batardeau
2	1968	Cochiti	USA New Mexico	Corps of Engineers CofE Albuquerque, NM	44 700	99 + 0	Fondation des conduites des ouvrages de vidange
3	1975	Tarbela	Pakistan	Pakistan Water & Power Dev. Auth. Tippett-Abbott-McCarthy-Stratton	350 000	111 + 0	Réparations de la galerie de l'ouvrage de vidange
4	1978	Bonneville (écluses et barrage)	USA Washington	Corps of Engineers CofE Portland, OR	13 000	166 + 0	Protection des surfaces du rocher contre l'altération à l'air
5	1978	Itaipu	Brésil et Paraguay	Itaipu Binacional Promon Engenharia SA	26 000		Remblai pour rampe d'accès
6	1979	Revelstoke	Canada Brit. Columbia	B C Hydro	7 600	169 + 0	Couverture de 3,6 m d'épaisseur pour batardeau
7	1980	Ohkawa	Japon Fukushima	Ministry of Construction	300 000	96 + 24	Radier de fondation
8	1981	Guri	Venezuela	Electricacion del Canoni CA Harza-EDELCA	15 570	100 + 0	Batardeau de 7 m de haut pour le 2 ^e canal de fuite
9	1982	Tucurui	Brésil Para	Themag Engenharia	12 230		Bajoyers de l'écluse de navigation
10		Holbeam Wood	Royaume-Uni	South West Water Authority			Noyau de 12 m de haut
11	1985	Lake Brazos Rénovation	USA Texas	City of Waco Harza Engineering	13 000	178 + 0	Fondation pour évacuateur de crue et bassin d'amortissement

LIST OF RCC APPLICATIONS (continued)
C - MISCELLANEOUS DAM APPLICATIONS

No.	Completed	Name of Dam	Country/ State	Owner/Engineer	RCC Volume m ³ (yd ³)	C + FA kg/m ³ (lb/yd ³)	Application
1	1960	Shihmen	Taiwan	Tippett-Abbott-McCarthy-Stratton		158 + 79 (94 + 47)	Core for cofferdam
2	1968	Cochiti	USA New Mexico	Corps of Engineers CofE Albuquerque, NM	44 700 (58 460)	99 + 0 (167 + 0)	Foundation for outlet works conduit
3	1975	Tarbela	Pakistan	Pakistan Water & Power Dev. Auth. Tippett-Abbott-McCarthy-Stratton	350 000 (460 000)	111 + 0 (187 + 0)	Outlet tunnel repairs
4	1978	Bonneville Lock & Dam	USA Washington	Corps of Engineers CofE Portland, OR	13 000 (17 000)	166 + 0 (280 + 0)	Protection of rock surfaces from air slaking
5	1978	Itaipu	Brazil & Paraguay	Itaipu Binacional Promon Engenharia SA	26 000 (34 000)		Backfill for access ramp
6	1979	Revelstoke	Canada Brit. Columbia	BC Hydro BC Hydro	7 600 (9 940)	169 + 0 (284 + 0)	3.6 m (12 ft) thick cap for cofferdam
7	1980	Ohkawa	Japan Fukushima	Ministry of Construction	300 000 (392 000)	96 + 24 (162 + 40)	Foundation mat
8	1981	Guri	Venezuela	Electricacion del Canoni CA Harza-EDELCA	15 570 (20 365)	100 + 0 (169 + 0)	7 m (23 ft) high cofferdam for second tailrace
9	1982	Tucurui	Brazil Para	Themag Engenharia	12 230 (16 000)		In navigation lock walls
10		Holbeam Wood	UK	South West Water Authority			12 m (33 ft) high core
11	1985	Lake Brazos Dam rehab	USA Texas	City of Waco Harza Engineering	13 000 (17 000)	178 + 0 (300 + 0)	Foundation for spillway and stilling basin

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : octobre 1989
N° 14762
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>