

EMBANKMENT DAMS GRANULAR FILTERS AND DRAINS

Review and recommendations

BARRAGES EN REMBLAI FILTRES ET DRAINS GRANULAIRES

Synthèse et recommandations

Bulletin 95



1994

The cover illustration is reproduced from Fig. 17.
Spreader box in use on the Raul Leoni (Guri) Dam in Venezuela.

*L'illustration de couverture reproduit la Fig. 17 du Bulletin.
Épandeuse utilisée au barrage de Raul Leoni (Guri), au Venezuela.*

Original text in English
French translation finalized by Y. Le May.
*Texte original en anglais
Traduction en français mise au point 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.

EMBANKMENT DAMS GRANULAR FILTERS AND DRAINS

Review and recommendations

BARRAGES EN REMBLAI FILTRES ET DRAINS GRANULAIRES

Synthèse et recommandations

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

COMMITTEE ON MATERIALS FOR FILL DAMS
COMITÉ DES MATÉRIAUX POUR BARRAGES EN REMBLAI
(1989-1995)

Chairman/Président Canada/Canada	G. S. LAROCQUE
Vice-Chairman/Vice-Président Russia/Russie	V. G. RADCHENKO
Members/Membres	
Australia/Australie	P. MACKENZIE
Austria/Autriche	P. TSCHERNUTTER
Colombia/Colombie	A. MARULANDA
Egypt/Égypte	W. SHENOUDA
Finland/Finlande	A. LESKELÄ
France/France	G. POST
Germany/Allemagne	H. STEFFEN
Great Britain/Grande-Bretagne	J. A. CHARLES
India/Inde	C. SUDHINDRA (1) E. DIVATIA (2)
Iran/Iran	N. TARKECH DOUZ
Italy/Italie	R. JAPPELLI
Japan/Japon	S. JOJIMA
Netherlands/Pays-Bas	J. WOESTENENK
New Zealand/Nlle-Zélande	M. D. GILLON
Portugal/Portugal	F. A. GUEDES DE MELLO
South Africa/Afrique du Sud	H. F. ELGES
Spain/Espagne	J. JIMENEZ SALAS (3) M. ALONSO FRANCO (4)
USA/États-Unis	D. E. KLEINER

(1) Member until 1993/Membre jusqu'en 1993.

(2) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(3) Member until 1992/Membre jusqu'en 1992.

(4) Member since 1992/Membre depuis 1992.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION DES FILTRES
3. RECHERCHES RÉCENTES SUR LES FILTRES
4. TECHNIQUE ACTUELLE
5. EXEMPLES
6. POINTS DE VUE CONTROVERSÉS
7. RÉFÉRENCES

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. EVOLUTION OF FILTER DESIGN PRACTICE
3. RECENT FILTER RESEARCH
4. CURRENT STATE OF PRACTICE
5. CASE HISTORIES
6. CONTROVERSIAL ISSUES
7. REFERENCES

APPENDICES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	8
1. INTRODUCTION	10
1.1. Spécifications de base pour les filtres et drains dans les barrages	10
1.2. Utilisation de filtres et drains dans les barrages en remblai	14
1.3. Conditions d'écoulement se présentant sur les filtres	14
1.4. Essais de laboratoire pour prévenir le développement de renards	16
1.5. Écoulement parallèle au contact entre les divers matériaux	20
2. ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION DES FILTRES	24
3. RECHERCHES RÉCENTES SUR LES FILTRES	34
3.1. Vaughan et Soares	34
3.2. Docteur James L. Sherard et US Soil Conservation Service	36
3.3. Professeur T. C. Kenney	40
3.4. Professeur Jean Lafleur	42
3.5. Professeur Josef Brauns et ses collègues	50
3.6. Autres travaux	52
4. TECHNIQUE ACTUELLE	54
4.1. Spécifications relatives à la conception des filtres	54
4.2. Pratique de construction	76
4.3. Différences entre la conception et la réalisation	84
5. EXEMPLES	88
6. POINTS DE VUE CONTROVERSÉS	94
6.1. Évaluation des matériaux de noyau à granulométrie étalée	94
6.2. Acceptation de la position de Sherard sur le rôle critique du filtre dans la protection du noyau	94
6.3. Valeur potentielle d'un filtre de sable au sommet d'un barrage, sur la face amont d'un noyau imperméable, pour remplir les fissures	96
6.4. Utilisation de géotextiles à la place de filtres granulaires	98
7. RÉFÉRENCES	104
ANNEXES	107
Annexe A - Terminologie	108
Annexe B - Questionnaire et réponses	114
Annexe C - Extrait d'un document russe intitulé « Principes de base de la technique des filtres inversés à l'interface avec des matériaux cohérents et non cohérents »	240

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	9
1. INTRODUCTION	11
1.1. Basic requirements of filters and drains in dams	11
1.2. Applications of filters and drains in embankment dams	15
1.3. Flow conditions acting on filters	15
1.4. Laboratory tests to prevent piping	17
1.5. Flow parallel to the interface	21
2. EVOLUTION OF FILTER DESIGN PRACTICE	25
3. RECENT FILTER RESEARCH	35
3.1. Vaughan and Soares	35
3.2. Dr. James L. Sherard and the US Soil Conservation Service	37
3.3. Prof. T. C. Kenney	41
3.4. Prof. Jean Lafleur	43
3.5. Prof. Josef Brauns and colleagues	51
3.6. Others	53
4. CURRENT STATE OF PRACTICE	55
4.1. Design requirements of filters	55
4.2. Construction practice	77
4.3. Differences between design and as-built	85
5. CASE HISTORIES	89
6. CONTROVERSIAL ISSUES	95
6.1. Evaluation of broadly-graded core materials	95
6.2. Acceptance of Sherard's reliance on the critical filter to protect the core	95
6.3. Potential value of sand filter at top of dam on upstream face of impervious core to act as a crack filler	97
6.4. Use of geotextiles as a substitute for granular filters	99
7. REFERENCES	104
APPENDICES	107
Appendix A - Terms and definitions	109
Appendix B - Questionnaire and responses	115
Appendix C - Excerpt of a russian document entitled "Basic principles of engineering inverted filters at the interface with cohesive and non-cohesive soils"	241

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig. 1. – Écoulements perpendiculaire et parallèle au contact filtre-matériau à protéger (Bakker et al., 1990).
- Fig. 2. – Détails de l'essai d'un filtre sans érosion (Sherard, 1989).
- Fig. 3. – Boîte-filtre, avec contact incliné, du Laboratoire d'Hydraulique de Delft (Bakker et al., 1990).
- Fig. 4. – Gradient hydraulique critique avec écoulement permanent parallèle au contact (Bakker, 1987).
- Fig. 5. – Barrage en enrochement de Nantahala - Coupe transversale, détails et granulométries des filtres (Growdon, 1958).
- Fig. 6. – Dimensions des particules passant ou retenues par le filtre en fonction de sa perméabilité (Vaughan, Soares, 1982).
- Fig. 7. – Méthode de Kenney et Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne de matériaux granulaires (Lafleur et al., 1989).
- Fig. 8. – Classification des courbes granulométriques de sols à granulométrie étalée (Lafleur et al., 1989).
- Fig. 9. – Étapes à suivre lors de la conception d'un filtre (Lafleur, Annexe B).
- Fig. 10. – Critères de filtre déduits d'une analyse probabiliste (Brauns et Witt, 1987).
- Fig. 11. – Critères pour matériau autofiltrant d'après Lowe (Jansen, 1988).
- Fig. 12. – Influence du type et de la quantité de matériaux fins sur la perméabilité d'un sable à béton, d'un mélange de sable et gravier, et d'un sable fin uniforme (US Army Corps of Engineers, 1986).
- Fig. 13. – Perméabilité des matériaux sableux et graveleux en fonction de la dimension D_{17} du matériau et de son coefficient d'uniformité (Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, 1974).
- Fig. 14. – Évaluation approximative de la réduction de la perméabilité de granulats uniformes par un écoulement turbulent (Cedergren, 1989).
- Fig. 15. – Qualités de filtration et de perméabilité exigées des drains dans les barrages en remblai (USBR, 1987).
- Fig. 16. – Représentation graphique des critères de ségrégation USDA SCS.
- Fig. 17. – Épandeuse utilisée sur le barrage Raul Leoni (Guri) au Venezuela.
- Fig. A.1. – Voûte produite par un écoulement descendant et des changements de granulométrie près de l'interface matériau de base/filtre (Lafleur et al., 1989).
- Fig. B.1. – Barrage de Guavio (Colombie) - Coupe transversale maximale.
- Fig. B.2. – Barrage de Salvajina (Colombie) - Coupe transversale maximale.
- Fig. B.3. – Aménagement de transfert d'énergie par pompage de Rocky Mountain - Barrage principal, coupe transversale maximale.
- Fig. B.4. – Churchill Falls - Incident sur la digue GJ-11 A.
- Tableau 1. – Résumé des premiers critères de conception de filtres (tiré de US Army COE, 1948).
- Tableau 2. – Critères pour filtres (USDA SCS, 1986; USBR, 1987).
- Tableau 3. – Granulométrie - Granulat fin à béton.
- Tableau 4. – Valeurs limites de D_{10} et D_{90} pour prévenir la ségrégation (USDA SCS, 1986; USBR, 1987).
- Tableau 5. – Résumé des exemples.

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1. – Flow perpendicular and parallel to filter/base interface (Bakker et al., 1990).
- Fig. 2. – No erosion filter test details (Sherard, 1989).
- Fig. 3. – Delft Hydraulics Laboratory filter-box with inclined interface (Bakker et al., 1990).
- Fig. 4. – Critical hydraulic gradient with steady flow parallel to interface (Bakker, 1987).
- Fig. 5. – Nantahala rockfill dam - Cross-section, details and filter gradations (Growdon, 1958).
- Fig. 6. – Size of particle passing or retained by filter versus filter permeability (Vaughan, Soares, 1982).
- Fig. 7. – Kenney and Lau's (1985) procedure for evaluating internal stability of granular materials (Lafleur et al., 1989).
- Fig. 8. – Classification of gradation curves of broadly graded soils (Lafleur et al., 1989).
- Fig. 9. – Sequence to follow for filter design (Lafleur, Appendix B).
- Fig. 10. – Filter criteria derived from probabilistic analysis (Brauns et Witt, 1987).
- Fig. 11. – Criteria for self-filtering material after Lowe (Jansen, 1988).
- Fig. 12. – Influence of type and amount of fines on permeability of concrete sand, sand-gravel mixture, and uniform fine sand (US Army Corps of Engineers, 1986).
- Fig. 13. – Permeability of sandy and gravelly materials versus the D_{17} size of the material and its uniformity coefficient (Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, 1974).
- Fig. 14. – Approximation for estimating reduction in permeability of uniform aggregate caused by turbulent flow (Cedergren, 1989).
- Fig. 15. – Filter and transmissibility needs of drains in embankment dams (USBR, 1987).
- Fig. 16. – Graphical presentation of USDA SCS segregation criteria.
- Fig. 17. – Spreader box in use on the Raul Leoni (Guri) dam in Venezuela.
- Fig. A.1. – Bridging induced par downward flow and changes in gradation near the base/filter interface (Lafleur et al., 1989).
- Fig. B.1. – Guavio dam - Maximum cross section (Colombia).
- Fig. B.2. – Salvajina dam - Maximum cross section (Colombia).
- Fig. B.3. – Rocky Mountain pumped storage project - Main dam, maximum cross section.
- Fig. B.4. – Churchill Falls - Dyke CJ-11 A incident.
- Table 1. – Summary of early filter design criteria (adapted from US Army COE, 1948).
- Table 2. – Criteria for filters (USDA SCS, 1986; USBR, 1987).
- Table 3. – Gradation - Fine concrete aggregate.
- Table 4. – D_{10} and D_{w} limits to prevent segregation (USDA SCS, 1986; USBR, 1987).
- Table 5. – Summary of case histories.

AVANT-PROPOS

Tout concepteur de barrage doit avoir à l'esprit l'importance primordiale des filtres et des drains dans le corps d'un barrage en terre, en terre et enrochement, ou en enrochement. En effet, nombre d'accidents et de ruptures sont imputables à l'absence de filtres et/ou de drains, ou encore à l'utilisation d'une protection non appropriée par filtres/drains. Les comptes rendus des Congrès de la CIGB et d'autres sources en fournissent de nombreux exemples, et montrent que 30 à 50 % de ces accidents sont dus à l'érosion interne ou à un drainage insuffisant : la sécurité des barrages en remblai dépend donc beaucoup d'une conception et d'une construction adéquates des systèmes de filtres et de filtres/drains.

L'information contenue dans ce Bulletin provient des réponses à un questionnaire adressé à plus de 300 personnes et organismes en août 1990. Plus de 70 réponses ont été reçues, ce qui traduit l'intérêt porté par la profession aux filtres et drains incorporés aux barrages en remblai.

Un court chapitre du Bulletin est consacré aux géotextiles utilisés comme filtres ou drains dans les barrages en remblai, bien que ce sujet soit en dehors du thème du Bulletin.

L'utilisation des filtres et des drains dans les barrages de stériles n'est pas traitée car elle fait l'objet d'un Bulletin « Conception du drainage pour les barrages de stériles », établi par le Comité CIGB des Barrages de Stériles Minières et Industriels et qui sera publié en 1994.

Le présent Bulletin n'est pas un manuel de conception mais plutôt une présentation résumée de la technique actuelle. Il s'adresse à tous ceux qui sont concernés par la conception et la construction de barrages en remblai, ainsi qu'à ceux chargés d'étudier et de mettre en œuvre des mesures correctives.

Il a été préparé essentiellement par David Kleiner, dans le cadre du Comité des Matériaux pour Barrages en Remblai des États-Unis dont il est Président, avec l'assistance des autres membres du Comité de la CIGB, et en particulier de Georges Post qui a revu les rédactions successives et présenté des commentaires pertinents. Que tous ceux qui nous ont accordé leur précieuse collaboration, au niveau de l'enquête ou de la préparation du Bulletin, soient vivement remerciés.

G. S. Larocque
Président du Comité des Matériaux
pour Barrages en Remblai

FOREWORD

The importance of filters and drains within the body of an earth, earth-rock, or rockfill dam must be uppermost in the mind of the embankment dam designer. Indeed, many incidents of failure or near failure can be attributed to the absence of filters and/or drains or to filter/drain protection which was not appropriate to the application. The literature within the various ICOLD Congress proceedings and other sources provides ample case histories of such incidents. Depending on the data cited, 30 to 50 percent of accidents to embankment dams have involved piping or inadequate drainage : the safety of embankment dams depends to a large degree on the proper design and construction of filter and filter/drain systems.

The material for this Bulletin is derived from the responses to a questionnaire sent to over 300 individuals and organizations throughout the world during August, 1990. More than 70 responses have been received, indicating the interest of the profession in filters and drains within embankment dams.

Although the use of geotextiles as filters or drains within embankment dams is beyond the scope of this Bulletin, a short section is devoted to their use.

The use of filters and drains within tailings dams is not included. This topic is being addressed in a forthcoming Bulletin "Design of Drainage for Tailings Dams ", by the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams.

The Bulletin is not meant to be a design manual but rather a summary of the current state of the practice. It is addressed to those who are involved in the design and construction of new embankment dams, and in the design and construction of remedial treatment to existing dams.

The principal author of the Bulletin was David Kleiner, Chairman, USCOLD Committee on Materials for Embankment Dams, with contributions from other ICOLD Committee members, including Georges Post who reviewed the drafts and offered insightful comments. We sincerely thank all those who provided assistance in the inquiry and preparation of this Bulletin.

G. S. Larocque
Chairman, Committee on Materials
for Fill Dams

1. INTRODUCTION

1.1. SPÉCIFICATIONS DE BASE POUR LES FILTRES ET DRAINS DANS LES BARRAGES

On exige deux fonctions fondamentales des filtres et des drains dans les barrages en terre, en terre et enrochement, ou en enrochement :

1) **Une fonction de rétention** : Le filtre doit empêcher le déplacement des particules de sol en provenance de la fondation adjacente ou des matériaux de remblai. Ainsi, un filtre fin doit empêcher le déplacement du matériau imperméable à grains plus fins ou du matériau de fondation; un filtre ou un drain grossier doit empêcher toute tendance à se déplacer du matériau plus fin. On désigne souvent la première exigence sous le nom de critère d'érosion interne ou de stabilité. Le terme critère de rétention a aussi été utilisé plus récemment (Lafleur, Annexe B).

Le critère classique de Terzaghi $D_{15}/d_{85} < 4$ couvre cette spécification. Les symboles suivants sont utilisés dans cette expression :

D_{15} = dimension de la particule dans le filtre (qui protège, ou le matériau plus grossier) pour laquelle il existe un pourcentage de 15 % en poids de particules plus petites; et

d_{85} = dimension de la particule dans le matériau de base (à protéger, ou le matériau plus fin) pour laquelle il existe un pourcentage de 85 % en poids de particules plus petites.

2) **Une fonction de perméabilité** : Le filtre doit pouvoir recevoir des débits de percolation venant de la fondation adjacente ou des matériaux de remblai sans développer des pressions hydrauliques trop élevées. Ainsi, un filtre fin doit recevoir facilement les débits de percolation venant du matériau imperméable à grains plus fins ou du matériau de fondation; un filtre ou un drain grossier doit recevoir facilement le débit de percolation venant du filtre adjacent. On mentionne souvent des rapports de perméabilité d'au moins 25 entre les matériaux adjacents. Un rapport de perméabilité de plus de 100 peut être requis pour tenir compte des variations dans le matériau de base et des conditions d'anisotropie qui pourraient résulter du compactage du filtre (qui réduit généralement la perméabilité verticale). Il faut apporter une attention particulière si le tassement différentiel ou le chargement causé par un séisme développe des fissures transversales du noyau (matériau de base).

Le critère classique de Terzaghi $D_{15}/d_{15} > 4$ couvre cette spécification. Si la fissuration du noyau s'avère possible et, dans plusieurs cas cela doit être envisagé, la présence de drains à grande capacité avec filtres appropriés est requise.

En pratique, ces deux exigences sont parfois en conflit. Pour éviter l'érosion interne, on peut installer un filtre dont la perméabilité est très proche de celle du matériau de remblai à grains fins ou du matériau de fondation. Dans ce cas, il peut

1. INTRODUCTION

1.1. BASIC REQUIREMENTS OF FILTERS AND DRAINS IN DAMS

Two fundamental functions are required of filters and drains in earth, earth-rock, and rockfill dams :

1) **Retention function** : The filter must prevent migration of soil particles from adjacent foundation or fill materials. Thus, a fine filter must prevent migration of finer-grained impervious fill or foundation material; a coarse filter or drain must prevent any tendency for movement of the fine filter. This first requirement is often referred to as the piping or stability criterion. More recently, the term retention criterion has been used (Lafleur, Appendix B).

The classic Terzaghi criterion $D_{15}/d_{85} < 4$ addresses this requirement. In this expression the following symbols are used :

D_{15} = particle size in filter (protecting, or coarser material) for which 15 % by weight of particles are smaller; and

d_{85} = particle size in base (protected, or finer material) for which 85 % by weight of particles are smaller.

2) **Permeability function** : The filter must accept seepage flows from adjacent foundation or fill materials without the buildup of excess hydrostatic pressure. Thus, a fine filter must readily accept seepage flows from a finer-grained impervious fill or foundation material; a coarse filter or drain must readily accept flow from an adjacent fine filter. Permeability ratios between adjacent materials of at least 25 are often quoted. To allow for variations of the base material and conditions of anisotropy as a result of compaction of the filter (which generally reduces vertical permeability) an average permeability ratio of over 100 may be needed. Special care must be taken if transverse cracking of the core (base) material can occur as a result of differential settlement or earthquake loading.

The classic Terzaghi criterion $D_{15}/d_{15} > 4$ addresses this requirement. If core cracking is a possibility, and in many instances it must be assumed, then high capacity drains with appropriate filters are required.

In practice, these two requirements have occasionally conflicted. In the interest of preventing internal erosion, a filter is constructed with a permeability very close to the adjacent fine-grained fill or foundation material. In this instance, high pore

y avoir développement de hautes pressions interstitielles et il n'est pas facile de se débarrasser de l'eau entrée dans le système de filtres. L'écoulement doit être assuré ailleurs.

Inversement, un filtre mal conçu ou mal construit est trop grossier pour le matériau fin adjacent et il peut se produire de la ségrégation au contact des deux matériaux. Cette situation peut provoquer un déplacement exagéré des particules fines du matériau adjacent dans le filtre. On retrouve des exemples spécifiques de tels problèmes dans la littérature.

Pour remplir les fonctions décrites ci-dessus, le filtre idéal ou la zone de filtre devra :

1) **Ne pas faire de ségrégation** durant la fabrication, le transport, la mise en place, l'épandage ou le compactage. La granulométrie du filtre doit être suffisamment uniforme pour qu'en prenant un soin approprié sur le terrain, on évite la ségrégation dans le matériau placé, particulièrement au contact entre les matériaux adjacents. Plusieurs réponses au questionnaire indiquent qu'il s'agit peut-être de l'exigence la plus importante.

2) **Ne pas présenter de changement dans la granulométrie** (rupture ou désagrégation) durant la fabrication, le transport, la mise en place, l'épandage et/ou le compactage; ou ne pas se désagréger avec le temps comme ce pourrait être le cas par le processus de gel-dégel ou encore d'écoulement. Le filtre doit être constitué de particules dures, résistantes, peu prédisposées à une dégradation causée par relâchement, altération ou autres mécanismes. La rupture du matériau amène des changements de perméabilité; ceci peut devenir critique si le filtre agit à la fois comme filtre et comme drain. La granulométrie du matériau est mesurée après la mise en place et le compactage. Cet essai permet aussi de mettre en évidence la désagrégation pouvant résulter du transport, de la manipulation, du compactage, et la contamination par les eaux de surface, la poussière ou d'autres activités de construction.

3) **Ne pas avoir de cohésion apparente ou réelle** ou une capacité à se cimenter par suite d'une action chimique, physique ou biologique. Le filtre doit rester sans cohésion pour qu'il n'y ait pas de tendance à la fissuration même si une zone adjacente a été endommagée par fissuration.

4) **Avoir une stabilité interne**, c'est-à-dire que la fraction grossière du filtre doit satisfaire aux critères de rétention (érosion interne) vis-à-vis de la fraction fine. Si le matériau présente une granulométrie étalée, il est probable qu'il y aura ségrégation lors de la manutention et la mise en place, et la stabilité interne peut devenir un problème sérieux.

5) **Avoir une capacité d'évacuation suffisante** pour que l'écoulement d'eau entrant dans le système soit évacué rapidement et en toute sécurité, sans trop de perte de charge. Ainsi, les systèmes filtres/drains, qu'ils soient positionnés comme une cheminée ou un tapis, devraient avoir une grande capacité d'évacuation. La conception de drains, qu'il s'agisse de cheminée ou de tapis, devrait toujours tenir compte du scénario le plus pessimiste; ceci peut vouloir dire un noyau fissuré, une fracturation hydraulique et/ou une ségrégation du noyau. Afin de répondre aux critères de rétention pour les diverses granulométries du matériau de base et pour fournir en même temps une capacité d'évacuation adéquate, une seule zone étroite

pressure can develop and seepage which enters the filter system is not readily carried away. Seepage may be forced elsewhere.

Conversely, a filter, improperly designed or constructed, is too coarse for the adjacent fine-grained material or the filter becomes segregated at the interface. This can lead to excessive movement of the adjacent fine material into the filter. Specific instances of these or similar problems abound in the literature.

To achieve the above functions, the ideal filter or filter zone will :

1) **Not segregate** during processing, handling, placing, spreading or compaction. The filter gradation must be sufficiently uniform such that, with appropriate care in the field, segregation is avoided in the placed material, especially at the interface between adjacent materials. Several respondents indicate that this requirement may be the most important.

2) **Not change in gradation** (degrade or break down) during processing, handling, placing, spreading and/or compaction; or degrade with time as might be caused by freeze-thaw or seepage flow. The filter must consist of hard, durable particles not susceptible to degradation as a result of slaking, weathering, or other mechanisms. Breakdown of material causes changes to the permeability; this becomes critical when the filter is acting both as a filter and a drain. The gradation of the material is measured after placement and compaction. This test includes the effects of particle crushing caused by transportation, handling, and compaction, and contamination by surface runoff, dust, or other construction activity.

3) **Not have apparent or real cohesion** or the ability to cement as a result of chemical, physical or biological action. The filter must remain cohesionless so that no tendency to crack exists even though an adjacent core zone may have been damaged by cracking.

4) **Be internally stable**, that is, the coarser fraction of the filter with respect to its own finer fraction must meet the retention (piping) criterion. If the material is broadly graded, segregation in handling and placement is more likely and internal stability can become a serious problem.

5) **Have sufficient discharge capacity** such that seepage entering the system is conveyed safely and readily with little head loss. Thus, chimney and blanket filter/drain systems must be designed with ample discharge capacity. The design of chimney and blanket drains should consider the worst scenario; this might include a cracked core, hydraulic fracturing, and/or core segregation. To achieve both the requirements of retention for the range of gradation of the base and to provide adequate seepage discharge capacity, a single narrow zone can rarely suffice. Either a large single zone or a filter and a free draining zone combination is usually required (Harlan, Appendix B). Cedergren (Appendix B) emphasizes the need for

est rarement suffisante. Il est nécessaire d'avoir une seule zone large ou bien une combinaison de zones de filtre et de drain (Harlan, Annexe B). Cedergren (Annexe B) insiste sur la nécessité d'une capacité suffisante d'écoulement du système filtre/drain. La perméabilité minimale requise et l'épaisseur des zones de filtre et de drain doivent être choisies en se basant sur la loi de Darcy pour calculer les débits probables de percolation qu'on devra évacuer.

6) Être en mesure de contrôler et de colmater un écoulement concentré à travers le noyau. L'essai de l'US Soil Conservation Service « Sans érosion » (Shepard et Dunnigan, 1985, 1989) peut être utilisé pour déterminer cette capacité.

1.2. UTILISATION DE FILTRES ET DRAINS DANS LES BARRAGES EN REMBLAI

Ce Bulletin traite de l'utilisation des filtres et des drains dans les barrages en terre, en terre et enrochement, ou en enrochement. Des exemples à caractère général sont présentés dans différents textes et dans le document « *Earth and Rock Fill Dams - General Design and Construction Considerations* » (US Army Corps of Engineers, 1982).

1.3. CONDITIONS D'ÉCOULEMENT SE PRÉSENTANT SUR LES FILTRES

On retrouve sur la Fig. 1 les deux conditions d'écoulement de base qui peuvent se présenter entre le filtre et le matériau à protéger. Des exemples types de ces conditions d'écoulement sont donnés ci-après :

1) Écoulement perpendiculaire ou presque au contact entre les deux matériaux :

a) du côté aval, au contact entre le noyau et le filtre fin dans un barrage en terre, en terre et enrochement, et en enrochement;

b) du côté amont, au contact entre le noyau et le filtre fin dans un barrage en terre, en terre et enrochement, ou en enrochement, à différents niveaux suivant la variation du plan d'eau du réservoir (écoulement du noyau vers le filtre lors d'un abaissement du niveau du réservoir);

c) aux contacts entre le filtre fin et le filtre grossier (drain) dans les cheminées, les tapis et les systèmes de drains en forme d'antenne en aval;

d) au contact entre les sols de fondation et la couche filtre du dessous dans un tapis filtre/drain ou un système de drains en forme d'antenne en aval;

e) au contact entre le remblai en terre et la couche filtre du dessus dans un tapis filtre/drain ou un système de drains en forme d'antenne en aval;

f) aux contacts entre les couches de sable/gravier et les couches de silt-argile à l'intérieur des fondations alluvionnaires près des pieds amont et aval des barrages en remblai, endroits où l'écoulement des infiltrations est perpendiculaire ou presque à la pente des couches.

sufficient discharge capacity of the filter/drain system. The required minimum permeability and thickness of filter and drain layers should be selected based on the use of Darcy's Law to calculate probable quantities of seepage that must be discharged.

6) **Have the ability to control and seal a concentrated leak** through the core. The US Soil Conservation Service "No Erosion Test" (Sherard and Dunnigan, 1985, 1989) may be used to determine this ability.

1.2. APPLICATIONS OF FILTERS AND DRAINS IN EMBANKMENT DAMS

This bulletin discusses the uses of granular filters and drains within earth, earth-rock and rockfill dams. Generalized examples are presented in various texts and in "*Earth and Rock Fill Dams - General Design and Construction Considerations*" (US Army Corps of Engineers, 1982).

1.3. FLOW CONDITIONS ACTING ON FILTERS

Fig. 1 illustrates the two basic flow conditions that can occur between a filter and base material. Typical examples of these two flow conditions are as follows :

1) Flow perpendicular or approximately perpendicular to the interface :

a) at the downstream contact between the core and fine filter in an earth, earth-rock or rockfill dam;

b) at the upstream contact between the core and fine filter in an earth, earth-rock or rockfill dam, locations subject to a fluctuating reservoir (flow from core to filter during reservoir drawdown);

c) at the contacts between the fine filter and coarse filter (drain) in downstream chimney, blanket and finger drains;

d) at the contact between foundation soils and the bottom filter layer in a downstream blanket filter/drain or finger drain system;

e) at the contact between earthfill and the top filter layer in a downstream blanket filter/drain or finger drain system;

f) at the contacts between sand-gravel layers and silt-clay layers within alluvial foundations near the upstream and downstream toes of embankment dams, locations where seepage flows are perpendicular or nearly perpendicular to the slope of the layers.

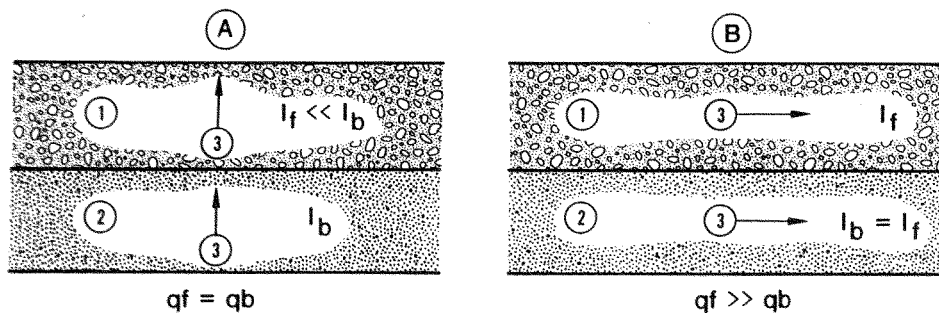
2) Écoulement parallèle ou presque au contact :

a) aux contacts entre les couches de filtre et le matériau de base, et entre les couches de filtre et le riprap ou revêtement sur les talus amont des barrages en remblai;

b) au contact entre la zone de protection en gravier-cailloux et le matériau de base sur les talus aval des barrages en remblai;

c) aux contacts entre les couches de sable-gravier et les couches de silt-argile à l'intérieur des fondations alluvionnaires, endroits où l'écoulement des infiltrations est parallèle ou presque à la pente des couches;

d) aux contacts entre les filtres grossiers et les filtres fins sur les fondations aval, où les tapis filtre/drain reçoivent un grand débit d'écoulement.



1.4. ESSAIS DE LABORATOIRE POUR PRÉVENIR LE DÉVELOPPEMENT DE RENARDS

Les différents essais utilisés pour évaluer le bon comportement des filtres ont été conçus pour reproduire l'une ou l'autre des conditions d'écoulement déjà décrites. Un montage type pour reproduire un écoulement perpendiculaire au contact entre deux matériaux est illustré à la Fig. 2; un montage type pour reproduire un écoulement parallèle au contact est illustré à la Fig. 3. Dans le cas de débits perpendiculaires au contact filtre/matériau de base, les critères de rétention qui se sont développés relient la granulométrie du filtre à celle du matériau de base sans tenir compte du gradient hydraulique dans le système. Dans le cas où le débit est parallèle au contact filtre/matériau de base, les critères de rétention proposés tiennent compte des effets du gradient hydraulique.

2) Flow parallel or approximately parallel to the interface :

a) at the contacts between bedding filters and base material, and between bedding filter and riprap or revetment on the upstream slopes of embankment dams;

b) at the contact between gravel-cobble slope protection and base material on the downstream slopes of embankment dams;

c) at the contacts between sand-gravel layers and silt-clay layers within alluvial foundations below embankment dams, locations where seepage flows are parallel or nearly parallel to the slope of the layers;

d) at the contacts between coarse filters and fine filters within high flow capacity filter/drain blankets on downstream foundations.

Fig. 1

Flow perpendicular and parallel to filter/base interface (Bakker, et al., 1990).

Écoulements perpendiculaire et parallèle au contact filtre/matériau de base (Bakker, et al., 1990).

- (A) Flow perpendicular to interface.
- (B) Flow parallel to interface.
- (1) Filter.
- (2) Base.
- (3) Direction of flow.
- (I) Hydraulic gradient.
- (q) Rate of flow.
- (b) Denotes base material.
- (f) Denotes filter material.

- (A) *Écoulement perpendiculaire au contact.*
- (B) *Écoulement parallèle au contact.*
- (1) *Filtre.*
- (2) *Matériau à protéger.*
- (3) *Direction de l'écoulement.*
- (I) *Gradient hydraulique.*
- (q) *Débit d'écoulement.*
- (b) *Indique le matériau de base.*
- (f) *Indique le matériau du filtre.*

1.4. LABORATORY TESTS TO PREVENT PIPING

The various filter tests used to evaluate the adequacy of filters have been set up to model one or the other of these flow conditions. A typical test set-up to model flow perpendicular to the interface is shown in Fig. 2; a typical test set-up to model flow parallel to the interface is shown in Fig. 3. For flow perpendicular to the filter/base interface, the retention criteria that have evolved relate the gradation of the filter to that of the base material without regard to hydraulic gradient within the system. For flow parallel to the filter/base interface, the retention criteria that have been proposed normally include the effect of hydraulic gradient.

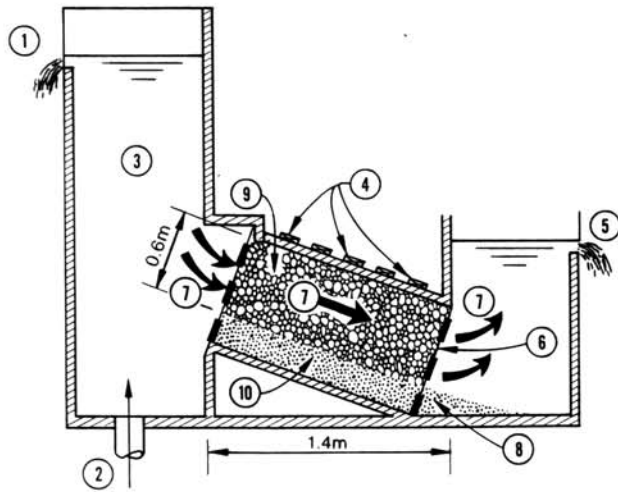
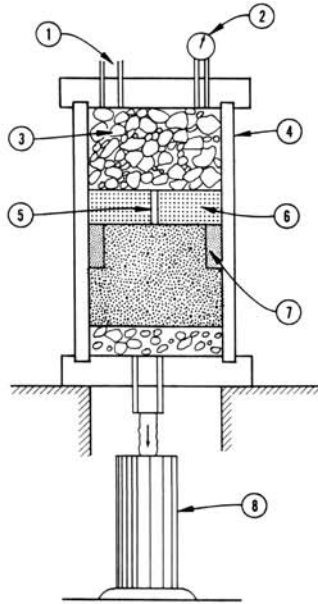


Fig. 2

No erosion filter test details (Sherard, 1989).

Détails de l'essai d'un filtre sans érosion (Sherard, 1989).

- | | |
|--|---|
| (1) Water source (high pressure). | (1) <i>Alimentation en eau (haute pression).</i> |
| (2) Pressure gage. | (2) <i>Jauge de pression.</i> |
| (3) Clean gravel. | (3) <i>Gravier propre.</i> |
| (4) Plastic cylinder (100 mm diameter for fine soils and 280 mm diameter for coarse soils). | (4) <i>Cylindre en plastique (diamètre de 100 mm pour des sols fins et de 280 mm pour des sols grossiers).</i> |
| (5) Preformed hole in base specimen (1.0 mm diameter for fine soils and 5 to 10 mm for coarse soils). | (5) <i>Trou effectué dans le matériau de base (diamètre de 1 mm pour des sols fins et de 5 à 10 mm pour des sols grossiers).</i> |
| (6) Compacted impervious base specimen (25 mm thick for fine soils and 100 mm thick for coarse soils). | (6) <i>Matériau de base compacté et imperméable (épaisseur de 25 mm pour des sols fins et de 100 mm pour des sols grossiers).</i> |
| (7) Side material (sand finer than filter). | (7) <i>Matériau latéral (sable plus fin que le filtre).</i> |
| (8) Graduated cylinder for measuring rate of flow. | (8) <i>Cylindre gradué pour mesurer le débit d'écoulement.</i> |

Fig. 3

Delft Hydraulics Laboratory filter-box with inclined interface (Bakker, et al., 1990).

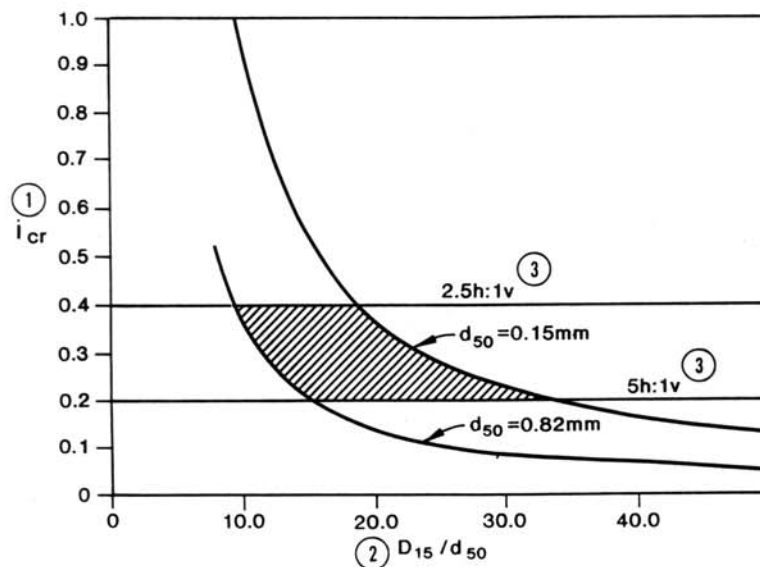
Boîte-filtre, avec contact incliné, du Laboratoire d'Hydraulique de Delft (Bakker, et al., 1990).

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| (1) Overflow. | (1) <i>Trop-plein.</i> |
| (2) Water supply. | (2) <i>Alimentation en eau.</i> |
| (3) Inflow. | (3) <i>Réservoir d'eau.</i> |
| (4) Ballast. | (4) <i>Lest.</i> |
| (5) Overflow. | (5) <i>Trop-plein.</i> |
| (6) Screen. | (6) <i>Grille.</i> |
| (7) Direction of flow. | (7) <i>Direction de l'écoulement.</i> |
| (8) Sand trap. | (8) <i>Collecte de sable.</i> |
| (9) Filter. | (9) <i>Filtre.</i> |
| (10) Base (sand). | (10) <i>Matériau de base (sable).</i> |

1.5. ÉCOULEMENT PARALLÈLE AU CONTACT ENTRE LES DIVERS MATÉRIAUX

Des modèles ont été préparés dans le cas d'écoulement parallèle au contact entre divers matériaux, tels que entre le riprap et le tapis filtrant, pour reproduire les cas particuliers d'écoulement sur le parement d'une digue ou d'un revêtement sujet à l'action des vagues, et l'écoulement parallèle aux berges d'un canal (réponses reçues des Pays-Bas et du Prof. Dr Josef Brauns, Annexe B). La recherche couvre des essais de laboratoire utilisant une disposition semblable à celle qui est montrée sur la Fig. 3 pour simuler cette condition d'écoulement. On peut faire varier la pente de l'appareil et en conséquence le gradient hydraulique.

Au Laboratoire d'Hydraulique de Delft, on utilise la plupart du temps comme matériau de base un sable fin uniforme, typique des sables trouvés sur la côte des Pays-Bas, ayant un d_{50} de 0,1 à 0,2 mm et un rapport $d_{90}/d_{10} = 2$. Plus loin à l'intérieur des terres, on trouve souvent des sables uniformes avec un d_{50} d'environ 0,4 mm. Un programme de nombreux essais a permis de démontrer que le critère classique d'érosion interne de Terzaghi $D_{15}/d_{85} < 4$ est trop prudent pour la conception de la protection des talus. La Fig. 4 donne une partie des résultats de la recherche hollandaise. Dans cette Fig., le gradient hydraulique, qui est généralement égal au gradient de la pente extérieure du remblai, est mis en graphique en fonction du rapport D_{15}/d_{50} . Des courbes sont tracées pour un d_{50} de 0,15 mm et un d_{50} de 0,82 mm. Ainsi, pour un sable uniforme formant le matériau de base et ayant un d_{50} d'environ 0,15 mm sur une pente de 5h:1v, le rapport D_{15}/d_{50} peut atteindre 30. L'utilisation de ce critère conduit à un filtre considérablement plus grossier que celui qui aurait été obtenu en utilisant le critère de Terzaghi.



1.5. FLOW PARALLEL TO THE INTERFACE

Flow parallel to the interface between adjacent materials, such as, between riprap and a bedding filter, has been modelled to simulate the specific cases of flow on the face of a dike or revetment subject to wave action, and the flow parallel to a canal bank (responses from the Netherlands and from Prof. Dr. Josef Brauns, Appendix B). The research includes laboratory testing using a test arrangement similar to that shown in Fig. 3 to model this flow condition. The slope of the device and thus, the hydraulic gradient, can be varied.

At the Delft Hydraulics Laboratory, the base material tested is commonly a uniform fine sand with a d_{50} of 0.1 to 0.2 mm, $d_{90}/d_{10} = 2$, typical of the sands found on the coast of the Netherlands. Farther inland, uniform sands with a d_{50} of about 0.4 mm are common. Extensive testing has shown that the classic Terzaghi piping criterion, $D_{15}/d_{85} < 4$ is too conservative for the design of slope protection. Fig. 4 is a summary of some of the Dutch research. In this figure, the hydraulic gradient, commonly equal to the slope gradient of the outer slope of the embankment, is plotted against the ratio, D_{15}/d_{50} . Curves for d_{50} equal to 0.15 mm and 0.82 mm are shown. Thus, for a uniform sand base material with a d_{50} of about 0.15 mm on a slope of 5h:1v, the ratio D_{15}/d_{50} can be as high as 30. Use of this criterion leads to a considerably coarser filter than that allowed if the Terzaghi criterion were used.

Fig. 4

Critical hydraulic gradient with steady flow parallel to interface (Bakker, 1987).

Gradient hydraulique critique avec écoulement permanent parallèle au contact (Bakker, 1987).

- | | |
|--|--|
| (1) Critical hydraulic gradient. | (1) <i>Gradient hydraulique critique.</i> |
| (2) Ratio of the D_{15} size of the filter to the d_{50} size of the base. | (2) <i>Rapport entre D_{15} du filtre et d_{50} du matériau de base.</i> |
| (3) Slope of interface between filter and base. | (3) <i>Inclinaison du contact filtre-matériau de base.</i> |

Pour le tapis de filtre sous le riprap, on trouve que les filtres qui ont une bonne granulométrie, entre un maximum de 8 à 10 cm (3 à 4 pouces) et les dimensions des sables grossiers, sont satisfaisants pour la grande majorité des barrages (CIGB, 1991). Ce filtre toutefois peut faire l'objet d'une ségrégation importante et ne pourra protéger de façon efficace un remblai de sable graveleux soumis aux fréquentes résurgences causées par l'action des vagues.

Les essais et critères mentionnés ci-dessus doivent être utilisés avec précaution. Les filtres et les drains dans les tapis, les bandes de drainage ou les matelas, c'est-à-dire les cas où l'écoulement est surtout parallèle au contact entre les matériaux, doivent être conçus de façon prudente et suivant les critères discutés dans les chapitres suivants de ce Bulletin.

For the bedding filter under riprap, it is found that “ filters which are reasonably well graded between a maximum of 8 to 10 cm (3 or 4 inches) and coarse sand sizes are satisfactory for the great majority of dams ” (ICOLD, 1991). This filter, however, may be subject to considerable segregation and will not protect efficiently a sandy gravel shell subjected to frequent surging from wave action.

The testing and criteria cited above should be applied with care. Filters and drains in blankets, fingers, or mattresses, i.e., cases where flow is mostly parallel to the interface, should be designed conservatively and in accordance with criteria discussed in later chapters of this Bulletin.

2. ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION DES FILTRES

Des filtres ont été utilisés dans la purification des eaux depuis les années 1800.

« Les premiers filtres rapides de sable étaient, dans la plupart des cas, constitués de tubes en bois, de 8 à 20 pieds de diamètre, remplis de 7 à 9 pieds de profondeur de sable... Pour les premiers filtres utilisés, le diamètre des grains de sable était plutôt faible avec un diamètre effectif (D_{50}) habituellement de 0,30 à 0,40 mm » (Baylis, 1959).

Une usine de filtration d'eau construite au New Jersey durant les années 1900 utilisait un sable ayant un diamètre effectif de 0,35 à 0,42 mm et pas plus de 1 % en poids de particules plus fines que 0,25 mm. Dans la pratique courante, on utilise un filtre plus grossier, ayant un D_{50} de l'ordre de 0,55 mm. Le coefficient d'uniformité, $C_u = D_{60}/D_{10}$, varie normalement de 1,2 à 1,5. On utilise ainsi, dans le domaine de l'ingénierie de l'environnement, des sables uniformes extrêmement fins pour la filtration de l'eau potable.

Dans le domaine des barrages en remblai, la conception des filtres a généralement suivi les critères de base suggérés par Terzaghi et vérifiés par Bertram. Le Corps des Ingénieurs de l'Armée Américaine a résumé les premiers critères de conception en 1948, comme indiqué au Tableau 1. Wilson et Marsal, en 1979, discutent de la conception des filtres dans le chapitre de leur rapport intitulé « Problèmes particuliers », reconnaissant ainsi l'importance et l'incertitude régnant autour de la conception des filtres dans la profession au moment de cette publication. Ils indiquent :

« Il est devenu évident durant les dernières années que les critères susmentionnés (référence au Tableau 1) ne fournissent pas assez de directives pour la conception des filtres adjacents à des sols à particules fines, pour les deux cas de sols intacts et fissurés. La stabilité interne à la fois du noyau et des matériaux filtres présente aussi d'autres aspects d'incertitude. »

Dans une réponse au questionnaire, Ripley (Annexe B) décrit étape par étape l'évolution de la conception des filtres. Le résumé suivant est tiré d'une série de transparents préparés par Ripley pour une tournée de conférences à travers le Canada en 1989 :

1) Durant les années 1800, on utilisait des sables fins uniformes comme filtre des particules fines dans le traitement des eaux.

2) Bligh a proposé en 1910 une série de règles empiriques basées sur une étude des ruptures par érosion interne et expulsion. Lane a ensuite proposé en 1935 une série calibrée de ces règles empiriques.

3) Durant les années 1920, Terzaghi a tenté d'expliquer les mécanismes de ruptures en termes de mécanique des sols à l'aide de réseaux d'écoulement, de

2. EVOLUTION OF FILTER DESIGN PRACTICE

Filters for use in purifying water have been used since the 1800s.

“ Early rapid sand filters were, for the most part, wooden tubs 8-20 feet in diameter and 7-9 feet in depth ... Sand sizes were small when filters were first used, usually 0.30-0.40 mm in effective size (D_{50}) ” (Baylis, 1959).

A water filtration plant constructed in New Jersey during the early 1900s used sand with an effective size of 0.35-0.42 mm and not more than 1 % by weight finer than 0.25 mm. Current practice is to use a somewhat coarser filter, ie. D_{50} about 0.55 mm. Uniformity coefficients, $C_u = D_{60}/D_{10}$, commonly range from 1.2 to 1.5. Thus, within the environmental engineering field, extremely uniform fine sands are used for potable water filtration.

Within the embankment dam profession, filter design has generally followed the basic criteria suggested by Terzaghi and verified by Bertram. The US Army Corps of Engineers, 1948, summarized early filter design criteria, Table 1. Wilson and Marsal, 1979, discuss filter design within the section of their report titled “Special Problems” thus recognizing the importance and uncertainty regarding filter design within the profession at the time of publication They state :

“ In recent years it has become apparent that the above criteria (referring to Table 1) do not provide sufficient guidance for the design of filters adjacent to fine-grained soils for both intact and cracked conditions Other areas of uncertainty concern the internal instability of both core and filter materials ... ”

In response to the questionnaire, Ripley (Appendix B) presented a step by step evolution of filter design practice. The following outline is taken from a series of overhead transparencies prepared by Ripley in 1989 for use in a trans-Canada lecture tour :

1) In the 1800s, uniform fine sands were used to filter fine particles to treat water supplies.

2) Bligh, 1910, proposed empirical creep-ratio rules, based on a study of underscour and blowout failures. This was followed by Lane's, 1935, “ weighted creep ratio ”.

3) During the 1920s, Terzaghi explained the mechanics of failures in soil mechanics terms using flow nets, uplift pressures at the downstream toe of

Tableau 1

Résumé des premiers critères de conception des filtres (tiré de US COE, 1948)

Chercheurs	Matériau de base	Matériau filtre	Critères développés
Terzaghi, 1922	On ignore s'il s'agit de critères basés sur des essais ou sur un raisonnement prudent		$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 < \frac{D_{15}}{d_{15}}$
Bertram, 1939	Sables uniformes de quartz d'Ottawa	Sables uniformes de quartz d'Ottawa	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 6, \frac{D_{15}}{d_{15}} < 9$
Newton et Hurley, 1940	Sable graveleux de bonne granulométrie	Graviers de rives naturelles. Les fractions plus fines sont progressivement éliminées. Filtres relativement uniformes.	$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 32, \frac{D_{15}}{d_{50}} < 15$
Station Expérimentale des Voies Navigables, 1941, 1948	Matériaux choisis au hasard. Sables fins et grossiers	Matériaux choisis au hasard incluant des graviers naturels tout-venant	$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4, < 20$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25, \frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$ Les courbes granulométriques des filtres doivent être plus ou moins parallèles à celles du matériau de base. Le filtre doit présenter une bonne granulométrie
Bureau de l'Ingénieur en Chef, Corps des Ingénieurs	Tous les types de matériaux	Sables à béton et granulats grossiers généralement recommandés	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5, \frac{D_{15}}{d_{15}} > 5$
Bureau of Reclamation des É-U, 1947 (pour talus de canaux et drains sous structures; arrêté en 1955)	Matériaux de diverses dimensions incluant des matériaux uniformes, mélangés artificiellement	Filtres uniformes mélangés artificiellement Filtres de bonne granulométrie, mélangés artificiellement	$\frac{D_{50}}{d_{50}} > 5, < 10$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} > 12, < 58$ $\frac{D_{15}}{d_{15}} > 12, < 40$
District de Providence, Corps des Ingénieurs, 1942	Tous les types de matériaux	Certains types généraux recommandés	Courbe du filtre de conception C_u du matériau de base en fonction de $\frac{D_{15}}{d_{15}}$

Table 1

Summary of Early Filter Design Criteria (adapted from US COE, 1948)

Investigators	Base Material	Filter Material	Criteria Developed
Terzaghi, 1922	Uncertain whether criteria based on experiments or conservative reasoning		$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 < \frac{D_{15}}{d_{15}}$
Bertram, 1939	Uniform quartz and Ottawa sands	Uniform quartz and Ottawa sands	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 6, \frac{D_{15}}{d_{15}} < 9$
Newton and Hurley, 1940	Well-graded gravelly sand	Natural bank gravels. Finer sizes successively screened out. Fairly uniform filters	$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 32, \frac{D_{15}}{d_{50}} < 15$
Waterways Experiment Station, 1941, 1948	Random material types. Fine to coarse sands	Random types including natural pit-run gravels	$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4, < 20$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25, \frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$ Gradation of filters should be more or less parallel to base. Filter should be well graded
Office, Chief of Engineers, Corps of Engineers	All types	Concrete sand and coarse aggregate generally recommended	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5, \frac{D_{15}}{d_{15}} > 5$
US Bureau of Reclamation 1947 (for canal slopes and drains under structures; discontinued in 1955)	Artificially blended materials of various ranges including uniform material	Artificially blended uniform filters Artificially blended well-graded filters	$\frac{D_{50}}{d_{50}} > 5, < 10$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} > 12, < 58$ $\frac{D_{15}}{d_{15}} > 12, < 40$
Providence District, Corps of Engineers 1942	All types	Certain general types recommended	Filter design curve C_u of base vs $\frac{D_{15}}{d_{15}}$

pressions de soulèvement au pied aval des structures et d'érosion interne régressive vers le réservoir. Il a proposé ses critères de filtre et présenté le concept des filtres inversés au pied aval. Il a expliqué la fonction de filtre pour empêcher la migration des particules, la fonction de drainage permettant de réduire les pressions interstitielles de soulèvement, et la fonction de charge pour neutraliser le soulèvement et le gonflement.

4) Durant les années 1930 et 1940, Terzaghi et Casagrande ont encouragé l'utilisation des filtres dans les barrages en terre par l'introduction de coupes types zonées et de tapis de drainage horizontaux. Casagrande a alors publié son article célèbre « Percolation à travers les barrages » (Casagrande, 1937).

5) J. P. Growdon a ensuite introduit aux États-Unis le barrage en enrochement déversé avec noyau incliné, montré sur la Fig. 5 et utilisant plusieurs filtres sous le noyau comme suit :

- a) Sable propre jusqu'à 12,7 mm (1/2 pouce).
- b) 12,7 à 75 mm (1/2 à 3 pouces).
- c) 75 à 250 mm (3 à 10 pouces).

Même s'il y a eu des affaissements considérables dans l'enrochement et un potentiel important de fissuration du noyau, il n'y a pas eu à notre connaissance de conditions de renard qui se sont développées.

6) Durant les années 1940, on a reconnu la possibilité de fissuration du noyau dans les barrages en remblai, ce qui a conduit à l'utilisation de systèmes de filtre/drain-cheminée. L'efficacité d'une cheminée drainante de sable propre pour résister aux effets nocifs de la fissuration du noyau a été prouvée au Brésil.

7) Des barrages en enrochement compacté avec un noyau central ou incliné ont été construits fréquemment durant les années 1950 et 1960. Le compactage de l'enrochement réduit le tassement de façon considérable et de nombreux filtres sont utilisés. Il n'y a pas eu d'incidents dus à des renards rapportés dans les articles publiés sur les barrages en enrochement conçus et construits dans les années 1940 et 1950 (Divers auteurs, ASCE, 1958). Harlan (Annexe B) fait le commentaire suivant :

« Durant les années 1950 et le début des années 1960, les barrages en enrochement déversé étaient construits avec des filtres, dont la granulométrie des filtres fins variait de 0,2 à 40 mm alors que celle des filtres grossiers allait de 5 à 100 mm. On utilisait souvent des boîtes d'épandage particulières avec des chicanes pour contrôler la ségrégation.

8) Durant les années 1960 et 1970, il y a eu une tendance à passer des filtres multiples de granulométrie uniforme à un filtre unique mais beaucoup plus épais présentant une granulométrie étalée, en pensant qu'une granulométrie étalée permet l'autocorrection, que la ségrégation ne présente pas de problème et que le parallélisme entre le matériau de base et le filtre est une nécessité. Plusieurs incidents d'érosion interne ont été rapportés, la plupart d'entre eux ayant pu être évités par l'utilisation de filtres multiples à granulométrie uniforme.

structures, and backward piping to the reservoir. He proposed his filter ratio criteria and presented the concept of weighted filters at the downstream toe. He explained the filter function to prevent particle migration, the drainage function to reduce uplift pore pressure and the weight function to counteract uplift and heave.

4) During the 1930s and 1940s, the application of filters to earthfill dams was promoted by Terzaghi and Casagrande through the use of zoned cross-sections and horizontal drainage blankets. Casagrande published his well-known paper, "Seepage through Dams" (Casagrande, 1937).

5) The sloping-core dumped-rockfill dam, introduced in the United States by J. P. Growdon, Fig. 5, used multiple filters below the core consisting of the following :

- a) clean sand to 12.7 mm (1/2 inch);
- b) 12.7 to 75 mm (1/2 to 3 inches);
- c) 75 to 250 mm (3 to 10 inches).

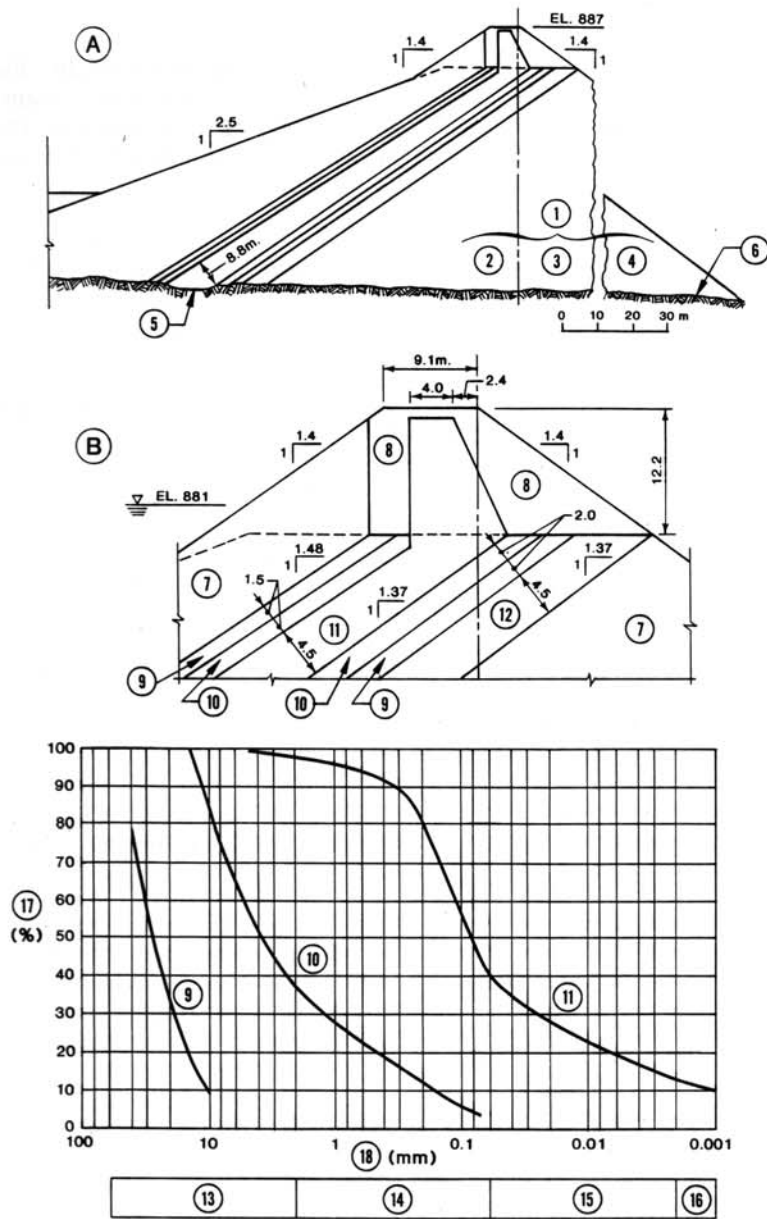
Although large settlements occurred within the rockfill and significant potential for core cracking was present, no piping is known to have developed.

6) Recognition in the late 1940s of the potential of core cracking in embankment dams led to use of chimney filter and drainage systems. The effectiveness of clean sand chimney drains to resist the adverse effects of core cracking was proven in Brazil.

7) During the 1950s and 1960s, dams with sloping or central cores with compacted rockfill shells were commonly used. The compacted rockfill significantly reduced settlement; multiple filters were utilized. No piping incidents were reported in a series of papers on rockfill dams designed and constructed in the 1940's and 1950's (Various authors, ASCE, 1958). Harlan (Appendix B) comments :

" In the late 1950s and early 1960s, dumped rockfill dams were constructed with graded filters. Fine filters were typically graded from 0.2 to 40 mm and coarse filters from 5 to 100 mm. Special spreader boxes with baffles were frequently used to control segregation. "

8) During the 1960s and 1970s, there was a trend away from uniformly-graded multiple filters to a single filter of substantial width and broad gradation based on a belief that broad gradations are self-healing, segregation is not a significant problem and parallelism between base and filter is necessary. Many incidents of serious piping resulted, most of which might have been prevented with the use of multiple filters of uniform gradation.



Dans une correspondance interne adressée à Dascal en 1977 (Annexe B), le Professeur Arthur Casagrande a fait les commentaires suivants à propos des critères de filtres nécessaires pour protéger les matériaux de moraines glaciaires :

« Notre profession n'a malheureusement pas compris et a mal appliqué les critères de filtre de Terzaghi. Ces critères ont été développés par Terzaghi durant les années 1930 lors de la conception de barrages en enrochement en Afrique du

Fig. 5

Nantahala rockfill dam - Cross section, details and filter gradations (Growdon, 1958).

Barrage en enrochement de Nantahala

Coupe transversale, détails et granulométries des filtres (Growdon, 1958).

- | | |
|---|--|
| (A) Typical cross section of dam. | (A) <i>Coupe transversale type du barrage.</i> |
| (B) Crest details. | (B) <i>Détails de la crête.</i> |
| (1) Quarry run rock. | (1) <i>Enrochement tout-venant de carrière.</i> |
| (2) Smaller sizes. | (2) <i>Petites dimensions.</i> |
| (3) Intermediate sizes. | (3) <i>Dimensions intermédiaires.</i> |
| (4) Larger sizes. | (4) <i>Grandes dimensions.</i> |
| (5) Surface under earth fill excavated to sound rock, min. elev. 810. | (5) <i>Surface du rocher sain, après excavation, sous le remblai, cote min. 810.</i> |
| (6) Surface excavated to rock. | (6) <i>Surface excavée jusqu'au rocher.</i> |
| (7) Quarry run rock. | (7) <i>Enrochement tout-venant de carrière.</i> |
| (8) Tunnel muck. | (8) <i>Matériaux d'excavation de galerie.</i> |
| (9) Crushed rock, 76 to 12 mm. | (9) <i>Roche concassée de 76 à 12 mm.</i> |
| (10) Sand, 12 mm minus. | (10) <i>Sable, passant 12 mm.</i> |
| (11) Impervious compacted fill. | (11) <i>Remblai imperméable compacté.</i> |
| (12) Selected rock, 250 to 76 mm. | (12) <i>Enrochement sélectionné, 250 à 76 mm</i> |
| (13) Gravel. | (13) <i>Gravier.</i> |
| (14) Sand. | (14) <i>Sable.</i> |
| (15) Silt. | (15) <i>Silt.</i> |
| (16) Clay. | (16) <i>Argile.</i> |
| (17) Percent finer by weight. | (17) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (18) Grain size in mm. | (18) <i>Dimension des particules en mm.</i> |

In unpublished correspondence with Dascal in 1977 (Appendix B) Prof. Arthur Casagrande commented on the filter criteria to protect glacial till materials :

“Unfortunately Terzaghi’s filter criteria have been misunderstood and misapplied by the profession. Terzaghi developed these criteria in the early thirties in connection with the design of rockfill dams in north Africa which are resting on

Nord, reposant sur des sables uniformes. Ces barrages étaient conçus avec un masque amont en béton se prolongeant à travers la fondation perméable sous la forme d'une paroi en béton. Terzaghi s'inquiétait du problème des infiltrations à travers les fissures de la paroi, sortant du sable sous les recharges en enrochement, avec un danger important d'érosion interne des sables. Il a donc mis au point ses critères pour la conception des filtres à partir d'essais de laboratoire et de considérations théoriques. Ils ont été développés pour des matériaux à granulométrie uniforme. Les sables de fondation de même que les diverses zones de filtre séparant le sable de l'enrochement avaient tous une granulométrie uniforme. Plusieurs années plus tard, on a proposé de remplacer les diverses couches de filtre coûteuses de matériau traité et à granulométrie uniforme par une seule couche de matériau de granulométrie étalée. Mais, il est virtuellement impossible de prévenir la ségrégation lors de la mise en place d'un matériau ayant une granulométrie étalée; et dans une zone de filtre étroite, on peut arriver inévitablement à former des poches de matériaux grossiers s'étendant sur toute l'épaisseur du filtre. Dans ce cas, le matériau du noyau peut être transporté à travers le filtre jusque dans la recharge en enrochement adjacente.

Une autre erreur grossière est d'appliquer les critères de filtre de Terzaghi à un matériau de noyau de granulométrie étalée, tel que les matériaux grossiers de moraine. Ceci conduit à la conception d'un filtre qui est beaucoup trop grossier.

Les critères de Terzaghi n'ont jamais été prévus pour être appliqués aveuglément à un tel matériau. J'ai recommandé, pendant plusieurs années, de placer une zone d'un bon sable à béton au voisinage d'un matériau grossier de moraine ou d'autres matériaux semblables; et au voisinage de cette première zone de filtre, une ou plusieurs autres zones de matériaux plus grossiers lorsqu'une zone d'enrochement se trouve à l'aval. »

Durant la deuxième partie des années 1970 et les années 1980, les chercheurs ont étudié la réaction entre des matériaux de base, aux caractéristiques variées, et les filtres granulaires. Le prochain chapitre du Bulletin présente de brefs résumés de plusieurs études.

uniform sands. These dams were designed with a concrete facing which is extended through the pervious foundation in form of a concrete cutoff wall. Terzaghi was concerned that seepage through cracks in the cutoff wall would exit through the sand surface into the rockfill shell with grave danger of erosion of sands by piping. To design the filter layers, he developed his criteria in part based on laboratory tests and in part using theoretical considerations. They were developed for materials with uniform gradation. The foundation sands and each of the several filter zones separating the sand from the rockfill had all uniform gradations. Many years later, others proposed to replace the expensive several filter layers of processed, uniform gradations by a single well-graded material. But it is virtually impossible to prevent segregation when placing a material with wide grading; and in a narrow filter zone one ends up inevitably with pockets of only coarse material across the entire thickness of the filter. At such places the core material can pipe easily through the filter into the adjoining rockfill shell.

Another serious mistake is to apply the Terzaghi filter criteria to widely graded core materials, such as coarse tills. This results in the “ design ” of a filter which is far too coarse.

The Terzaghi criteria were never intended to be applied blindly to such material. For several decades I have recommended next to coarse till, or similar core materials, a zone of good quality concrete sand; and next to that zone one or more coarser layers when using downstream a rockfill zone. ”

During the late 1970s and 1980s, researchers studied the reaction between base materials with varying characteristics and granular filters. Brief summaries of several studies are presented in the next section.

3. RECHERCHES RÉCENTES SUR LES FILTRES

3.1. VAUGHAN ET SOARES

Le noyau d'argile du barrage Balderhead (Vaughan et Soares, 1982) s'est fissuré et a subi une érosion interne en 1967. Il y a eu ségrégation dans les débris érodés et le filtre a failli à sa tâche de retenir les particules fines qui l'atteignaient.

Les fissures qui se développent dans un noyau d'argile peuvent rester ouvertes et relativement stables. Les particules plus fines peuvent être érodées, laissant les particules plus grossières en place. C'est dire qu'on ne peut compter sur l'obturation des fissures par les débris érodés plus grossiers. Étant donné que les particules les plus fines du noyau peuvent être transportées par une fissure à travers le noyau jusqu'au filtre, Vaughan et Soares, 1982, ont proposé que le filtre parfait devrait être conçu pour retenir les particules les plus fines qui peuvent circuler durant le processus d'érosion. Ce critère ne dépend pas des qualités auto-filtrantes des débris érodés et devrait agir indépendamment du degré de ségrégation produit. Étant donné que l'agglomérat des particules d'argile constitue la plus petite particule dans le sol de base, on doit pouvoir compter sur un filtre de sable non cohérent pour les retenir.

On a entrepris un programme de recherches en laboratoire pour établir une relation entre l'agglomérat des particules d'argile et la granulométrie du filtre parfait. On a trouvé qu'il semblait y avoir une relation entre la dimension d'une particule retenue par un filtre et sa perméabilité. L'étude suggère que la perméabilité est peut-être un meilleur moyen pour qualifier le comportement des filtres que leur granulométrie et peut fournir un autre critère lors de la conception de filtres pour des sols non cohérents. La relation expérimentale établie entre la dimension de la particule retenue et la perméabilité du filtre est montrée à la Fig. 6.

La perméabilité du filtre peut être déterminée par des essais en laboratoire ou peut, en première approximation, être estimée à l'aide des relations entre le D_{10} ou le D_{15} et la perméabilité, tel que proposé par Sherard (Sherard, et al., 1984 b) :

$$k = 3\,500 D_{15}^2 \text{ (varie de } 2\,000 \text{ à } 6\,000 D_{15}^2 \text{ lors des essais de laboratoire; noter que la perméabilité change rapidement avec la teneur en particules fines, voir discussion au chapitre Spécifications de conception)}$$

où

k = perméabilité en m/s, et
 D_{15} = la dimension D_{15} du filtre, en mètres.

Le critère de filtre parfait de Vaughan tient compte de la possibilité de ségrégation du matériau du noyau et de l'érosion des particules fines dans le noyau. Le

3. RECENT FILTER RESEARCH

3.1. WORK BY VAUGHAN AND SOARES

The clay core of the Balderhead Dam (Vaughan and Soares, 1982) suffered cracking and internal erosion in 1967. Segregation of the eroded debris was observed and the filter failed to retain the finer particles that reached it.

Cracks that develop in a clay core may remain open and relatively stable. Finer particles may be eroded leaving the coarser particles in place. Therefore, plugging of a crack by coarser eroded debris cannot be relied upon. Because the finest material within the core can be carried through a crack to the filter, Vaughan and Soares, 1982, suggested that a "perfect" filter should be designed to retain the smallest particle which can arise during erosion. This criterion does not depend on self-filtering of eroded debris and should operate independently of the amount of segregation. Since the clay floc is the smallest particle in base soil, a non-cohesive sand filter to retain such clay flocs must be provided.

A laboratory program was undertaken to relate clay floc size with the gradation of the perfect filter. It was found that a relationship appears to exist between the size of particle retained by a filter and its permeability. The study suggests that permeability may be a more appropriate means to quantify filter performance for clays than gradation, and may provide an alternative concept for the design of filters for non-cohesive soils. Fig. 6 presents the experimental relationship between particle size retained and the permeability of the filter.

Permeability of the filter may be determined by laboratory test or, as a first approximation, may be estimated by relationships between the D_{10} or D_{15} and permeability such as that suggested by Sherard (Sherard, et al, 1984 b):

$$k = 3\,500 D_{15}^2 \text{ (ranged from } 2\,000 \text{ to } 6\,000 D_{15}^2 \text{ in laboratory tests;}$$

note that permeability changes rapidly with the fines content,
see discussion under Design Requirements)

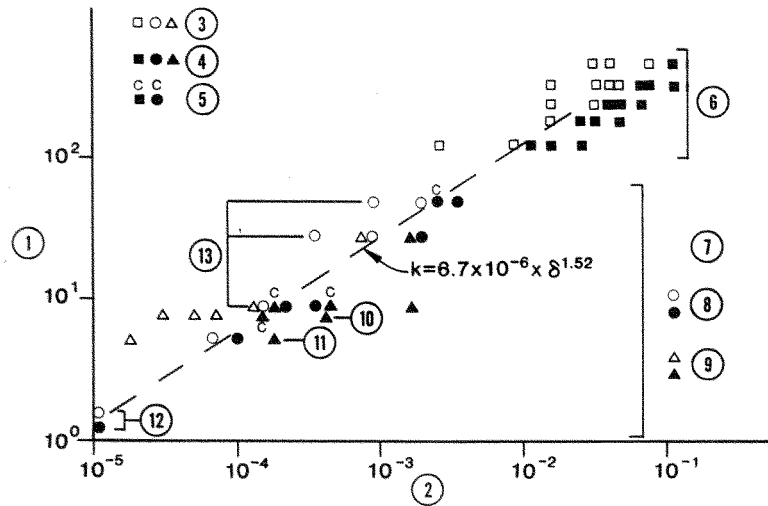
where :

k = permeability in m/s, and

D_{15} = D_{15} size of the filter in meters.

Vaughan's perfect filter criterion considers the possibility of segregation of the core and the erosion of the finest particles within the core. The criterion is severe

critère est rigoureux et la perméabilité n'est pas un paramètre pratique à contrôler ou à confirmer sur le terrain. Les filtres ayant une faible perméabilité peuvent de plus présenter une certaine cohésion.



3.2. Dr JAMES L. SHERARD ET US SOIL CONSERVATION SERVICE

Le grand intérêt porté par Sherard à la fissuration et à l'érosion interne dans les barrages en remblai se manifeste amplement dans ses écrits (Sherard, 1973, 1979, 1985). Cet intérêt a provoqué l'établissement d'un programme de recherches au laboratoire de mécanique des sols de l'US Soil Conservation Service (USDA SCS) à Lincoln, Nebraska, durant la première partie des années 1980. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs rapports (Sherard, et al., 1984 a, 1984 b, 1985, 1989) et on en a tenu compte dans l'établissement des critères de filtres de l'US Soil Conservation Service et du Bureau of Reclamation (USDA SCS, 1986; USBR, 1987 a). On présente les principales conclusions de cette recherche au Tableau 2.

Talbot écrit dans une correspondance récente portant sur les critères SCS pour filtres (Talbot, Annexe B) :

« A part les critères présentés au Tableau 2, la note (Mécanique des sols, Note n° 1, Guide pour trouver la granulométrie des filtres en sables et graviers) couvre 10 étapes qui expliquent comment concevoir un filtre. L'étape 10 indique que, pour certains sols, les limites granulométriques de filtre obtenues en utilisant les critères peuvent être plutôt larges, permettant ainsi d'utiliser des filtres à granulométrie discontinue, et qu'une marge plus étroite devrait être spécifiée à l'intérieur de ce large fuseau granulométrique pour éviter cette difficulté.

Après six ans d'utilisation du guide, SCS a décidé d'aller un peu plus loin et d'insérer des détails additionnels dans le SCS National Engineering Handbook. Nous croyons qu'il est important d'utiliser un matériau relativement uniforme et de

and permeability is not a practical parameter to control or confirm in the field. In addition, low permeability filters may exhibit some cohesion.

Fig. 6

Size of particle passing or retained by filter versus filter permeability (Vaughan, Soares, 1982).
Dimensions des particules passant ou retenues par le filtre en fonction de la perméabilité du filtre
 (Vaughan, Soares, 1982).

- | | |
|--|--|
| (1) Particle size D_{85} , μm . | (1) Dimension de la particule D_{85} , μm . |
| (2) Filter permeability, m/s. | (2) Perméabilité du filtre, m/s. |
| (3) Effective filter. | (3) Filtre efficace. |
| (4) Non-effective filter. | (4) Filtre non efficace. |
| (5) Clogging. | (5) Colmatage. |
| (6) Uniform filter tests. | (6) Essais de filtre uniforme. |
| (7) Suspension tests. | (7) Essais de suspension. |
| (8) Uniform filter. | (8) Filtre uniforme. |
| (9) Graded filter. | (9) Filtre étalé. |
| (10) Flocculated clay, Empingham tests. | (10) Argile flocculée, essais Empingham. |
| (11) Flocculated clays, Cow Green tests. | (11) Argiles flocculées, essais Cow Green. |
| (12) London clay with dispersion. | (12) Argile de Londres dispersive. |
| (13) Quartz particles. | (13) Particules de quartz. |

3.2. WORK BY Dr. JAMES L. SHERARD AND THE US SOIL CONSERVATION SERVICE

Sherard's great interest in cracking and piping in embankment dams is amply described in his writings (Sherard; 1973, 1979, 1985). This interest led to the research conducted in the Lincoln, Nebraska soil mechanics laboratory of the US Soil Conservation Service (USDA SCS) during the early 1980s. Their work has been widely reported (Sherard, et al., 1984 a, 1984 b, 1985, 1989) and has been incorporated into the design criteria for filters by the US Soil Conservation Service and by the US Bureau of Reclamation (USDA SCS, 1986; USBR, 1987 a). The basic conclusions from this research are presented in Table 2.

In recent correspondence concerning the SCS criteria for filters, Talbot states (Talbot, Appendix B) :

“ Besides the criteria presented in Table 2, the note (Soil Mechanics Note No. 1, Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters) contains 10 steps explaining how to design a filter. Step 10 indicates that for some soils, the filter gradation limits obtained using the criteria can be rather broad so as to allow the use of skip-graded or gap-graded filters, and that a narrow band should be specified within the broad limits to prevent this.

After using our guide for six years, SCS has decided to make some refinements and insert it into the SCS National Engineering Handbook. We believe it is important to use relatively uniform granular materials and to ensure gap or skip

s'assurer que des matériaux à granulométrie discontinue ne sont pas utilisés. L'ébauche finale de notre guide révisé en est aux dernières étapes de préparation. Elle comprend des spécifications pour que les limites granulométriques du filtre recommandé du côté fin ou du côté grossier respectent un coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10}) de six ou moins. La bande du filtre doit aussi être étroite de sorte que le rapport des dimensions des particules les plus grosses aux plus fines soit de cinq ou moins et ceci pour tous les pourcentages des particules passant de 60 ou moins. Cette bande étroite qui définit un matériau de granulométrie uniforme peut se trouver n'importe où à l'intérieur du large fuseau granulométrique obtenu en utilisant les critères. »

Tableau 2
Critères pour filtres (USDA SCS 1986, USBR 1987 a)

Sols à protéger Catégorie	Description du sol à protéger et pourcentage plus fin que le tamis n° 200 (0,075 mm) (1)	Critères de filtre (2)
1	Silts fins et argiles; plus de 85 % plus fins	$D_{15} \leq 9 \times d_{85}$ (3)
2	Sables, silts, argiles et sables silteux et argileux; 40 à 80 % plus fins	$D_{15} \leq 0,7$ mm
3	Sables et graviers silteux et argileux; 15 à 39 % plus fins	$D_{15} \leq \frac{40 - A}{40 - 15} (4 \times d_{85} - 0,7 \text{ mm}) + 0,7 \text{ mm}$ (4) (5)
4	Sables et graviers; moins de 15 % plus fins	$D_{15} \leq 4 \times d_{85}$ (6)

(1) Le choix de la catégorie pour un sol contenant des particules plus grosses que le tamis n° 4 (4,75 mm) est fixé à partir de la courbe granulométrique du sol à protéger qui a été ajustée à 100 % passant le tamis n° 4 (4,75 mm).

(2) Les filtres doivent présenter des particules d'un diamètre maximal de 75 mm (3 pouces) et un pourcentage maximal de 5 % passant le tamis n° 200 (0,075 mm) avec un indice de plasticité (IP) des fines égal à zéro. **(Noter que les critères basés sur le rapport D_{60} au D_{10} indiqués au Tableau 4 de ce Bulletin doivent être utilisés pour concevoir les plages granulométriques du filtre. Ces critères contraignent le concepteur à utiliser des granulométries de filtre uniformes, ce qui contribue à diminuer la ségrégation durant la mise en place. Note insérée par l'auteur pour plus de clarté).** IP est déterminé à l'aide de la fraction du matériau passant le tamis n° 40 (0,425 mm) comme exigé par la norme ASTM-D-4318. Pour assurer une perméabilité suffisante, les filtres doivent avoir un D_{15} égal ou plus grand que $4 \times d_{15}$ mais pas plus petit que 0,1 mm.

(3) Quand $9 \times d_{85}$ est plus petit que 0,2 mm, utiliser 0,2 mm.

(4) A = pourcentage passant le tamis n° 200 (0,075 mm) après reclassement.

(5) Quand $4 \times d_{85}$ est plus petit que 0,7 mm, utiliser 0,7 mm.

(6) Dans la catégorie 4, le d_{85} doit être déterminé à partir de la courbe granulométrique originelle du sol à protéger sans ajustement pour les particules plus grosses que 4,75 mm.

graded materials are not used. The final draft of our revised guide is in the last stages of preparation. It includes requirements that the coarse and fine sides of the specified filter band have a coefficient of uniformity (D_{60}/D_{10}) of six or less. Also, the filter band must be narrow such that the ratio of maximum particle size to minimum particle size is five or less at all percent passing values of 60 or less. The narrow band defining uniformly graded material may be located anywhere within the broad limits defined by the criteria.”

Table 2
Criteria for Filters (USDA SCS, 1986; USBR, 1987 a)

Base Soil Category	Base Soil Description, and Percent Finer than No. 200 (0.075 mm) sieve (1)	Filter Criteria (2)
1	Fine silts and clays; more than 85 % finer	$D_{15} \leq 9 \times d_{85}$ (3)
2	Sands, silts, clays and silty and clayey sands; 40 to 85 % finer	$D_{15} \leq 0.7$ mm
3	Silty and clayey sands and gravels; 15 to 39 % finer	$D_{15} \leq \frac{40 - A}{40 - 15} (4 \times d_{85} - 0.7 \text{ mm}) + 0.7 \text{ mm}$ (4) (5)
4	Sands and gravels; less than 15 % finer	$D_{15} \leq 4 \times d_{85}$ (6)

(1) Category designation for soil containing particles larger than the No. 4 sieve (4.75 mm) is determined from a gradation curve of the base soil which has been adjusted to 100 % passing the No. 4 (4.75 mm) sieve.

(2) Filters are to have a maximum particle size of 75 mm (3 inches) and a maximum of 5 % passing the No. 200 (0.075 mm) sieve with the plasticity index (PI) of the fines equal to zero. **(Note that the criteria relating the D_{90} to the D_{10} shown on Table 4 of this Bulletin must be used to design the filter gradation ranges. These criteria force the designer to use uniform filter gradations which help to prevent segregation during placement. Note inserted by author for clarity.)** PI is determined on the material passing the No. 40 (0.425 mm) sieve in accordance with ASTM-D-4318. To ensure sufficient permeability, filters are to have a D_{15} size equal to or greater than $4 \times d_{15}$ but no smaller than 0.1 mm.

(3) When $9 \times d_{85}$ is less than 0.2 mm, use 0.2 mm.

(4) A = percent passing the No. 200 (0.075 mm) sieve after any regrading.

(5) When $4 \times d_{85}$ is less than 0.7 mm, use 0.7 mm.

(6) In category 4, the d_{85} may be determined from the original gradation curve of the base soil without adjustments for particles larger than 4.75 mm.

D'autres conclusions de cette recherche sont les suivantes :

1) On n'a pas trouvé de relations ou de corrélations entre D_{50} et d_{50} ou entre D_{15} et d_{15} qui améliorent le comportement du filtre. Les précédents critères de filtre utilisant les relations D_{50}/d_{50} ou D_{15}/d_{15} doivent être abandonnés. Les spécifications $D_{15}/d_{15} \geq 4$ peuvent être adoptées pour assurer une perméabilité adéquate du filtre, mais ne sont pas nécessaires pour définir les propriétés du filtre.

2) Dans le cas des moraines glaciaires grossières caractéristiques, qui ont une granulométrie allant des blocs aux particules fines, et d'autres sols imperméables présentant une granulométrie semblable, la recherche USDA SCS a démontré qu'un sable ou un sable graveleux avec un $D_{15} \leq 0,7$ mm était nécessaire pour obtenir un filtre aval prudent.

3) L'essai de filtrage sans érosion (Sherard, et al., 1985, 1989) (Fig. 2) donne un meilleur résultat que l'essai fait avec une boue et une fente utilisé dans la première partie de la recherche. « On a trouvé que cet essai est le meilleur pour l'évaluation routinière des filtres en laboratoire pour des projets spécifiques. Il peut être utilisé à la fois pour des essais sur des matériaux imperméables grossiers ou des argiles fines ou des silts » (Sherard, et al., 1985).

4) « La recherche approfondie faite en laboratoire récemment, de même que l'évaluation de l'expérience pratique du comportement des barrages, confirmer la conclusion que des filtres adéquats vont colmater et contrôler de façon sûre les écoulements concentrés à travers les noyaux des barrages en remblai » (Sherard, et al., 1985).

3.3. PROF. T. C. KENNEY

Plusieurs chercheurs ont tenté, durant les dernières années, de trouver une base théorique pour justifier les méthodes employées dans le choix de la courbe granulométrique des filtres dans les barrages. Les approches à ce problème englobent l'utilisation de méthodes probabilistes (Silveira, 1965) pour modéliser la distribution des vides de diverses dimensions dans un filtre et estimer la dimension maximale des particules qui pourraient être lessivées à travers ce filtre.

Des recherches expérimentales et théoriques plus poussées ont conduit au concept de la dimension de resserrement de contrôle (Kenney, et al., 1985). La dimension de resserrement de contrôle (D_c^*) se définit comme la dimension de la particule la plus grosse qui puisse être transportée à travers un filtre d'une épaisseur donnée. L'épaisseur du filtre n'est pas un facteur important parce que la largeur pratique des filtres *in situ* excède de beaucoup l'épaisseur requise pour l'action de filtration.

La recherche analytique et expérimentale indique que la dimension de resserrement de contrôle dépend très peu de la forme de la courbe granulométrique et de l'épaisseur du filtre, mais est liée à la distribution granulométrique de la partie fine du filtre. Les relations :

$$D_c^* \leq 0,25 D_5 \quad \text{et} \quad D_c^* \leq 0,20 D_{15}$$

définissent la dimension de resserrement de contrôle par rapport au D_5 et au D_{15} du filtre.

Other conclusions of the research included :

1) No relationship or correlation was found between D_{50} and d_{50} or between D_{15} and d_{15} for filter performance. Previous filter criteria employing D_{50}/d_{50} or D_{15}/d_{15} relationships should be abandoned. Requirements of D_{15}/d_{15} equal to four or more may be used to assure adequate permeability of the filter, but are not needed to define filter properties.

2) For typical coarse glacial moraines, graded from cobbles to fines, and other similarly graded impervious soils, the USDA SCS research demonstrated that a sand or gravelly sand with $D_{15} \leq 0.7$ mm is needed for a conservative downstream filter.

3) The no erosion filter test (Sherard et al, 1985, 1989), Fig. 2, is superior to the slot and slurry tests used during the earlier research. " It was found to be the best test for routine laboratory evaluation of filters for specific projects. It is applicable for tests on coarse impervious soils as well as fine clays and silts " (Sherard, et al., 1985).

4) " Both recent extensive laboratory research and evaluation of experience with dam behavior support the conclusion that adequate filters will reliably seal and control concentrated leaks through earth cores of embankment dams " (Sherard, et al., 1985).

3.3. WORK BY PROF. T. C. KENNEY

In recent years several researchers have tried to find a theoretical basis to support the methods used to select the gradation of filters for dams. The approaches to the problem have included the use of probabilistic methods (Silveira, 1965) to model the void-size distribution of the filter and to estimate the maximum size of particles that could be washed through it.

Further experimental and theoretical analyses led to the concept of the controlling constriction size (Kenney, et al., 1985). The controlling constriction size (D_c^*) is defined as the maximum possible size of particle that can be transported through a filter of specific thickness. Thickness of filter is not a significant factor because the practical width of filters in the field far exceeds the thickness required for filtering action.

Analytical and experimental research indicates that the controlling constriction size is largely independent of the shape of the grain size distribution curve and thickness of the filter, but is related to the gradation of the fine fraction of the filter. The relationships :

$$D_c^* \leq 0.25 D_5 \quad \text{and} \quad D_c^* \leq 0.20 D_{15}$$

define the controlling constriction size with respect to the D_5 and the D_{15} of the filter.

L'étude expérimentale propose que le concept de la dimension de resserrement de contrôle s'applique à la conception des filtres pour des sols pulvérulents avec un coefficient d'uniformité inférieur à 6. Le programme d'essais ne comprenait pas de sols avec un coefficient d'uniformité plus élevé et n'est pas applicable aux sols cohérents. Le concept de la dimension de resserrement de contrôle est utile parce qu'il amène à concentrer l'attention sur la dimension de la particule la plus grosse qui puisse traverser le filtre dans les conditions les plus sévères.

Kenney (Kenney et Lau, 1985) a fait des recherches sur la stabilité interne des matériaux granulaires. Cette recherche a démontré que, lorsque des échantillons de courbes granulométriques différentes étaient soumis à un débit d'eau les traversant, quelques-uns subissaient des pertes de particules fines et pouvaient être jugés instables, alors que les autres n'étaient pas affectés. Les auteurs ont cherché à fixer une frontière entre un comportement stable et un comportement instable, et ont proposé l'utilisation de cette méthode pour évaluer la stabilité interne d'un matériau donné. Cette limite se définit comme suit :

$$H = 1,3 F$$

où

H = le pourcentage de poids entre deux dimensions de particules : d et 4 d;

F = le pourcentage de poids des particules plus fines.

Les conditions d'essai employées pour établir cette ligne de démarcation sont très sévères et considérées comme prudentes. A la fin de son article de 1985, le Prof. Kenney (Annexe B) admet que ces conditions sont prudentes et remplace la relation précitée par la suivante :

$$H = F$$

3.4. PROF. JEAN LAFLEUR

Le Prof. Lafleur (Lafleur, et al., 1989) présente une application de la méthode Kenney/Lau dans les Fig. 7 A et 7 B qui montrent les courbes granulométriques et les courbes de forme de deux sols. Ces dernières courbes donnent un profil continu du pourcentage de poids des particules plus fines, F, fonction de la différence du pourcentage des masses, H, entre les deux dimensions de particules, d et 4 d. Quand un segment de la courbe de forme se situe au-dessus de la limite oblique pour $F < 20\%$, il pourrait se produire une certaine migration interne des particules. La courbe du sol 1 se situe au-dessus de la limite, ce qui suggère la migration de certaines particules fines. Au contraire, la courbe du sol 2 (Fig. 7 B) se situe entièrement en dessous de la limite et, par conséquent, le sol peut être considéré comme stable.

Lafleur et ses collègues (Lafleur, et al., 1989) ont testé des moraines glaciaires non cohérentes à granulométrie étalée de la Baie James, en utilisant deux essais de tamisage (le matériau de base placé sur des tamis de diverses ouvertures) et les essais de compatibilité (matériau de base placé contre le filtre). L'allure des courbes granulométriques et la classification des courbes de forme sont illustrées sur la Fig. 8. Les matériaux ont été analysés en conformité avec la méthode Kenney et Lau pour évaluer la sensibilité à la stabilité interne.

The experimental study suggests the application of the concept of controlling constriction size to the design of filters for cohesionless soils with uniformity coefficients less than 6. The test program did not include soils with larger coefficients of uniformity and is not applicable to cohesive base soils. The concept of controlling constriction size is useful because it focuses attention on the maximum size particle that can pass through the filter under the most critical conditions.

Kenney (Kenney, Lau, 1985) investigated the internal stability of granular materials. The research showed that, when samples with several grain-size distributions were subjected to through flow, some grain-size distributions experienced loss of fine particles and could be considered unstable, while other grain-size distributions did not experience such loss of fine material. The authors defined a boundary between stable and unstable behavior and proposed the use of this method for evaluating the internal stability of a given material. The boundary is defined by :

$$H = 1.3 F,$$

where

H = percent of mass between two grain sizes : d and 4 d;

F = percent of mass finer.

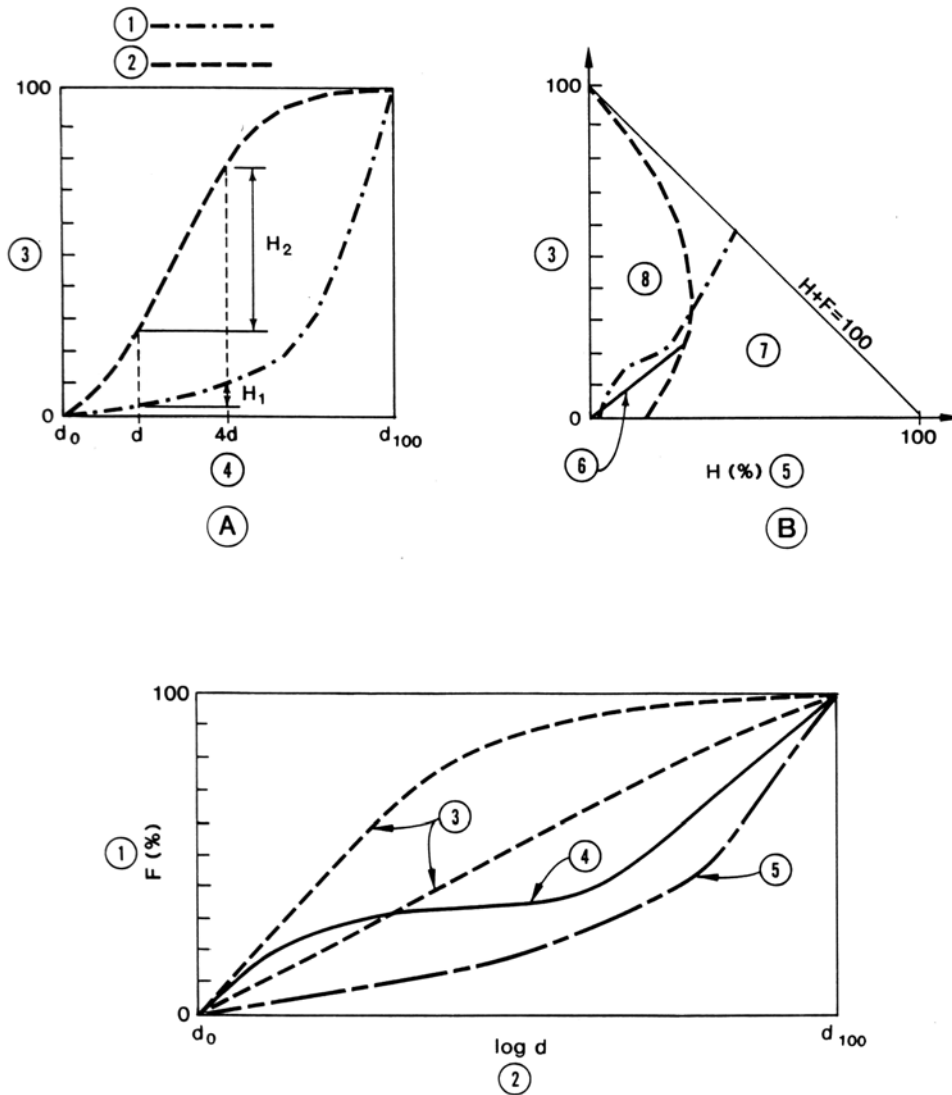
The test conditions used to define the above boundary are severe and are considered to be conservative. In the closure to his 1985 paper, Prof. Kenney (Appendix B) recognized the conservative test conditions and revised the above relationship to :

$$H = F$$

3.4. WORK BY PROF. JEAN LAFLEUR

Prof. Lafleur (Lafleur, et al., 1989) demonstrates the use of the Kenney/Lau method in Fig. 7 A and 7 B which show the gradation curves and shape curves, respectively, of two soils. The latter curves are continuous profiles of the percent finer by mass, F, versus the difference in mass percent, H, between two grain sizes, d and 4 d. When part of the shape curves falls above the oblique boundary for $F < 20\%$, some internal migration is likely to occur. Soil curve 1 falls above this boundary, suggesting some migration of the finer particles. In contrast, soil curve 2 (Fig. 7 B) is entirely below the boundary, and consequently, it can be considered internally stable.

Lafleur and his colleagues (Lafleur, et al., 1989) tested broadly-graded non-cohesive glacial tills from the James Bay region using both screen tests (base material against screens with various size openings) and compatibility tests (base against filter). The shape of the gradation curves of the tills that were tested and the classification of curve shape are shown on Fig. 8. Materials were examined in accordance with the Kenney and Lau method to estimate susceptibility to internal stability.



Ils ont analysé plusieurs paramètres influençant le mécanisme de filtration de ces sols, et leur application à la conception des filtres. On en a conclu que le critère de rétention normal ne pouvait pas être utilisé directement pour les sols à granulométrie étalée; que l'utilisation de la dimension des vides du filtre (ou dimension de resserrement de contrôle) correspondant à la fraction plus fine du sol était inefficace, et que l'utilisation du d_{85} comme caractéristique du matériau à protéger pourrait conduire à des pertes substantielles. Les essais ont indiqué qu'une certaine migration de matériau était requise pour établir un état d'équilibre à l'interface filtre/matériau de base. Les études ont montré que l'effet voûte (à noter que Lafleur, et al., 1989 ont utilisé le terme « autofiltration »), pour des sols à granulométrie étalée, était relié au coefficient d'étalement (dimension réelle de l'ouverture/ dimension minimale des particules).

Fig. 7

Kenney and Lau's (1985) procedure for evaluating internal stability of granular materials (Lafleur, et al., 1989).

Méthode de Kenney et Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne de matériaux granulaires (Lafleur, et al., 1989).

- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) Gradation curve. | (A) <i>Courbe granulométrique.</i> |
| (B) Shape curve. | (B) <i>Courbe de forme.</i> |
| (1) Soil no. 1, unstable. | (1) <i>Sol n° 1, non stable.</i> |
| (2) Soil no. 2, stable. | (2) <i>Sol n° 2, stable.</i> |
| (3) Percent finer by weight. | (3) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (4) Log of grain size, d. | (4) <i>Log de la dimension des particules, d.</i> |
| (5) As defined in A. | (5) <i>Tel que défini en A.</i> |
| (6) Boundary ($H = 1.3 F$). | (6) <i>Limite ($H = 1,3 F$).</i> |
| (7) Stable. | (7) <i>Stable.</i> |
| (8) Non stable. | (8) <i>Non stable.</i> |

Fig. 8

Classification of gradation curves of broadly graded soils (Lafleur, et al., 1989).

Classification des courbes granulométriques de sols à granulométrie étalée (Lafleur, et al., 1989).

- | | |
|------------------------------|---|
| (1) Percent finer by weight. | (1) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (2) Log of grain size, d. | (2) <i>Log de la dimension des particules, d.</i> |
| (3) Linearly graded. | (3) <i>Granulométrie linéaire.</i> |
| (4) Gap graded. | (4) <i>Granulométrie discontinue.</i> |
| (5) Concave upward. | (5) <i>Concave vers le haut.</i> |

They analyzed several parameters that influence the filtration mechanics of these soils and their applicability to the design of filters. It was found that the usual retention criteria cannot be directly used for broadly-graded soils; that the use of opening size (or constriction size) of the filter corresponding to the finer fraction of the soil was not practical, and that the use of d_{85} as indicative base size would lead to large base losses. The tests indicated that some migration of material is required to establish a state of equilibrium at the filter/base interface. The studies showed that the “bridging” (note that “self-filtration” was used in Lafleur, et al., 1989) process of broadly-graded soils is related to the broadness coefficient (actual soil opening size/minimum particle size).

A partir des résultats des essais de laboratoire, Lafleur, et al., ont tiré les conclusions suivantes :

« La sélection des filtres granulaires pour les sols à granulométrie étalée doit tenir compte de l'effet voûte qui se développe à l'interface matériau de base-filtre. Il n'est pas pratique de sélectionner une dimension de vide (dans le filtre) correspondant aux particules les plus fines du sol; il est aussi inadéquat d'utiliser la limite supérieure d_{85} du sol, compte tenu de la grande quantité des particules du sol à protéger qui seront transportées. »

... Le programme d'essais de compatibilité a confirmé que la dimension des vides du filtre devait être comparée avec une dimension choisie pour le matériau à protéger, qui implique une migration minimale des particules. Pour les sols à granulométrie linéaire (et à granulométrie étalée), la valeur de la dimension minimale représentative du sol à protéger est égale à d_{50} , et l'effet voûte va conduire à l'équilibre. On a déterminé aussi que pour les sols à granulométrie discontinue, d_{sf} (diamètre caractéristique des particules des sols à protéger capables d'initier l'effet voûte) devait correspondre à la fraction inférieure de la discontinuité, puisque les particules grossières de ces sols n'intervenaient pas dans l'effet voûte.

Lafleur (Annexe B) suggère ce qui suit :

La Fig. 9 présente un diagramme ordonné des diverses étapes à suivre lors de la conception des filtres granulaires. La donnée fondamentale est la courbe granulométrique du matériau à protéger. Ce diagramme sépare les matériaux susceptibles de se fissurer, c'est-à-dire matériaux cohérents, des matériaux non cohérents. En se référant à ces derniers, la première étape est de déterminer s'ils ont une granulométrie étalée ($C_u > 20$). Les sols avec un $C_u < 20$ doivent être considérés à granulométrie étalée s'ils développent de la ségrégation durant la mise en place. Si le sol n'a pas une granulométrie étalée, la dimension d'autofiltration d_{sf} est égale à d_{85} ; les filtres sont conçus selon les critères de rétention classique de Terzaghi. Si le sol a une granulométrie étalée, sa composition granulométrique appartient à l'un des trois groupes présentés sur la Fig. 8.

- 1) Pour un sol à protéger de granulométrie linéaire, d_{sf} est égal à la dimension médiane d_{50} .
- 2) Pour un sol à granulométrie discontinue, d_{sf} correspond à la limite inférieure de la discontinuité.
- 3) Pour un sol à courbe granulométrique concave vers le haut, d_{sf} est égal à d_{20} ; cependant, le risque d'autocolmatage doit être pris en considération puisque la zone immédiatement adjacente au filtre peut être moins perméable que le sol à protéger.

La dimension d'autofiltration du sol à protéger doit alors être comparée à la dimension « de sécurité » ou vide admissible O_f du filtre, qui est égale à $D_{15}/4$ pour respecter le critère de rétention. Finalement, le critère de perméabilité, soit la comparaison entre d_{15} et D_{15} , doit être vérifié.

As a result of the laboratory tests, Lafleur, et al., concluded :

“ The selection of granular filters for broadly-graded soils must take into account the bridging process taking place at the base-filter interface. It is not practical to choose an opening size (in the filter) corresponding to the finer soil particles nor is it proper to use the d_{85} upper limit of the soil because the quantity of base particles that will be washed out is large. ”

... The compatibility test program has supported that the opening size of filters must be compared with an indicative base size that involved minimal particle migrations. For linearly-graded (and broadly-graded) soils, the value of the minimum indicative base size is equal to the d_{50} , and the bridging process will lead to equilibrium. It was also found that for gap-graded soils, d_{sf} (characteristic diameter of base particles capable of initiating bridging) should correspond to the lower fraction of the gap since the coarser particles of these soils do not intervene in the bridging process.

Lafleur (Appendix B) suggests the following :

Fig. 9 shows a proposed flow chart that gives the sequence to follow for the design of granular filters. The basic data is the grain-size curve of the base. This chart separates the crack-susceptible materials, i.e. cohesive, from cohesionless materials. Considering the latter, the first step is to determine if they are broadly-graded ($C_u > 20$). Soils with $C_u < 20$ should be considered as broadly graded if the soil segregates during placement. If the soil is not broadly-graded, the self-filtration size, d_{sf} , is equal to d_{85} ; filters are designed in accordance with the conventional Terzaghi retention criteria. If the soil is broadly-graded, its gradation curve belongs to one of the three groups presented on Fig. 8.

- 1) With a linearly-graded base soil, d_{sf} is equal to the median size, d_{50} .
- 2) With a gap-graded soil, d_{sf} corresponds to the lower size of the gap.
- 3) With a concave upward graded soil, d_{sf} is equal to d_{20} ; the risk of self-clogging however, should be taken into account since the zone immediately adjacent to the filter can be less permeable than the base soil.

The self-filtration size of the base is then compared to the filter “ safe ” or allowable opening size, O_f , equal to $D_{15}/4$, in order to fulfill the retention criterion. Finally, the permeability criterion comparing the d_{15} with the D_{15} is checked.

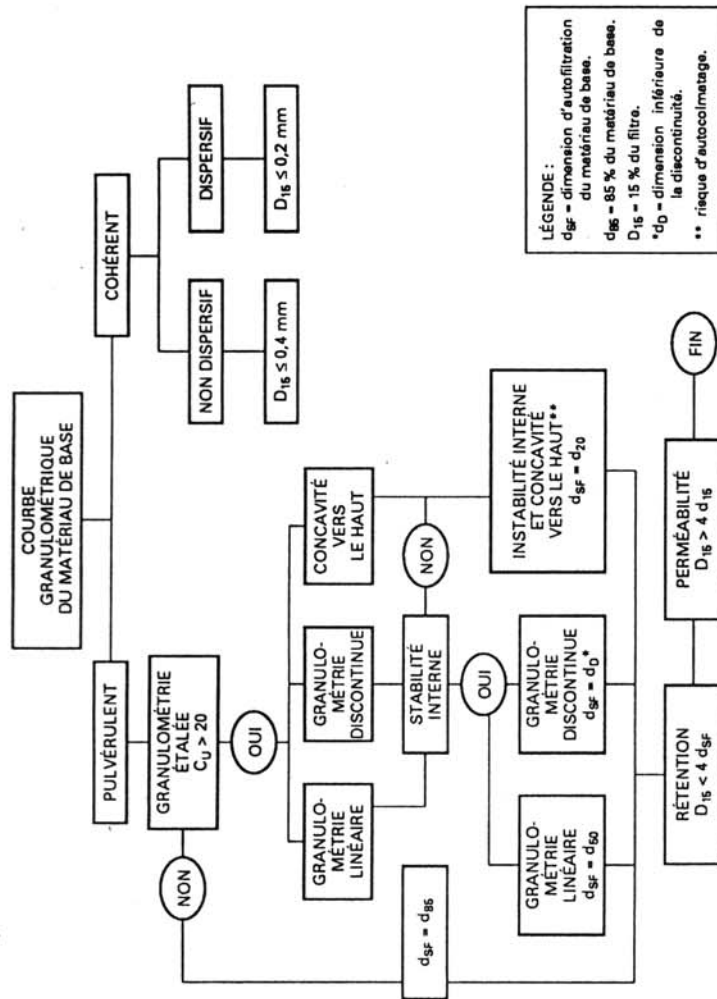


Fig. 9

Étapes à suivre lors de la conception d'un filtre (Lafleur, Annexe B).

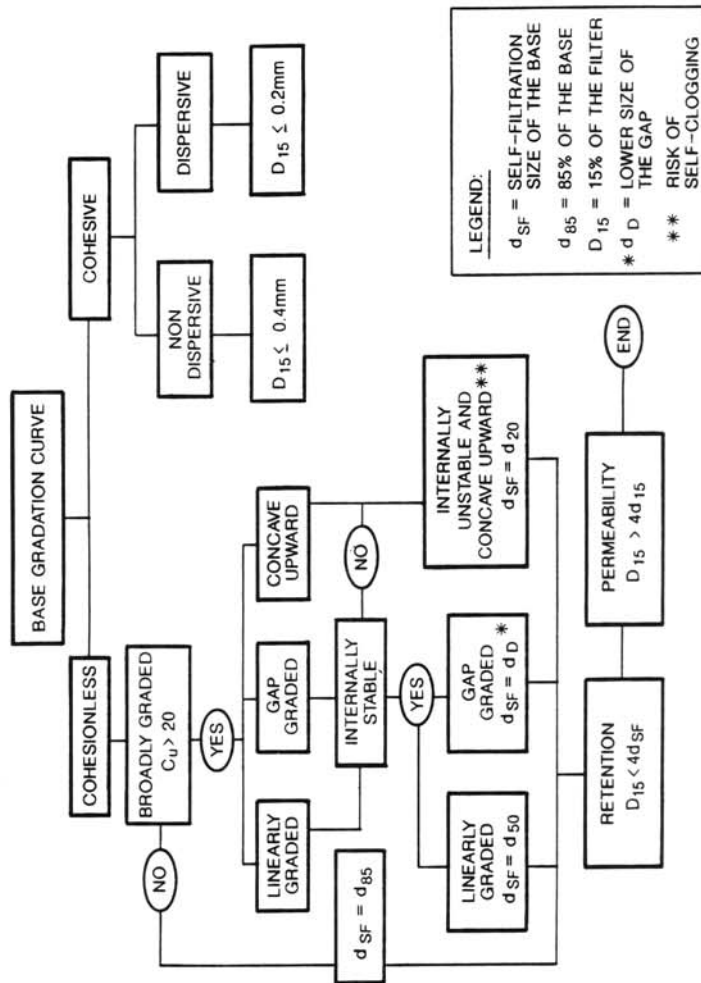


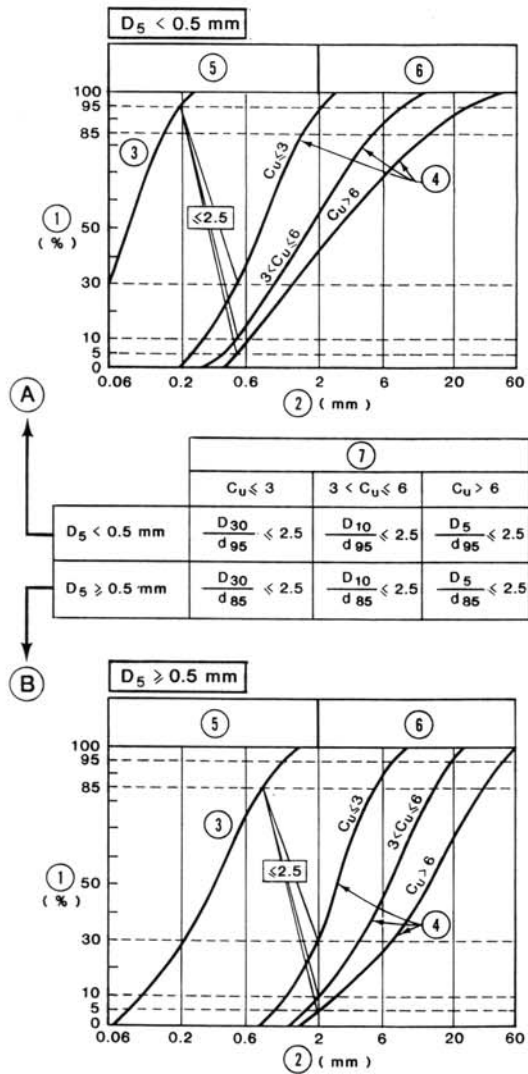
Fig. 9

Sequence to follow for filter design (Lafleur, Appendix B).

3.5. PROF. JOSEF BRAUNS ET SES COLLÈGUES

Des recherches considérables ont été réalisées par Josef Brauns et ses collègues, spécialement Karl Witt et Lutz Wittmann, sur les filtres soumis à des écoulements parallèles et perpendiculaires à l'interface filtre/matériau de base. Les analyses du mécanisme de filtration ont été développées à partir de considérations théoriques et expérimentales. Une liste partielle de leur contribution est présentée à l'annexe B.

Witt (Brauns et Witt, 1987) a proposé un critère de filtre s'appuyant sur une analyse probabiliste, voir Fig. 10. Les propositions sont faites pour des matériaux à protéger présentant une stabilité interne et relativement uniformes.



3.5. WORK BY PROF. JOSEF BRAUNS AND COLLEAGUES

Considerable filter research under flow conditions parallel and perpendicular to the filter/base interface has been conducted by Josef Brauns and his colleagues, especially Karl Witt and Lutz Wittmann. Analyses of the filtration mechanism has been developed on both theoretical and experimental bases. A partial list of their contributions is presented in Appendix B.

Witt (Brauns and Witt, 1987) has proposed filter criteria based on probabilistic analysis, see Fig. 10. The proposals are suggested for base materials which are internally stable and relatively uniform.

Fig. 10

Filter criteria derived from probabilistic analysis (Brauns, Witt, 1987).

Critères de filtre déduits d'une analyse probabiliste (Brauns, Witt, 1987).

- | | |
|---|--|
| (A) For fine-grained filter, $D_s < 0.5$ mm. | (A) <i>Pour filtre à granulométrie fine
$D_s < 0,5$ mm.</i> |
| (B) For coarse-grained filter, $D_s \geq 0.5$ mm. | (B) <i>Pour filtre à granulométrie grossière
$D_s \geq 0,5$ mm.</i> |
| (1) Percent finer by weight. | (1) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (2) Grain size in mm. | (2) <i>Dimension des particules en mm.</i> |
| (3) Gradation of base. | (3) <i>Granulométrie du matériau de base.</i> |
| (4) Gradation of filter. | (4) <i>Granulométrie du filtre.</i> |
| (5) Sand. | (5) <i>Sable.</i> |
| (6) Gravel. | (6) <i>Gravier.</i> |
| (7) Coefficient of uniformity of filter. | (7) <i>Coefficient d'uniformité du filtre.</i> |

Une discussion approfondie sur les filtres, les drains, la stabilité interne et la recherche courante sur les filtres est présentée par Brauns dans un article soumis à l'Institut des Études Avancées du NATO (Brauns, 1990).

3.6. AUTRES TRAVAUX

La portée de ce Bulletin ne permet pas une discussion détaillée des travaux des autres chercheurs. Les lecteurs sont renvoyés à l'annexe B, qui présente une liste des divers documents mentionnés par tous ceux qui ont répondu au questionnaire.

An in-depth discussion of filters, drains, internal stability and current filter research is presented by Brauns in a paper contributed to the NATO Advanced Study Institute (Brauns, 1990).

3.6. WORK BY OTHERS

The scope of this Bulletin does not allow detailed discussions of the work of other researchers. The reader is referred to Appendix B, which lists the various documents submitted by all respondents.

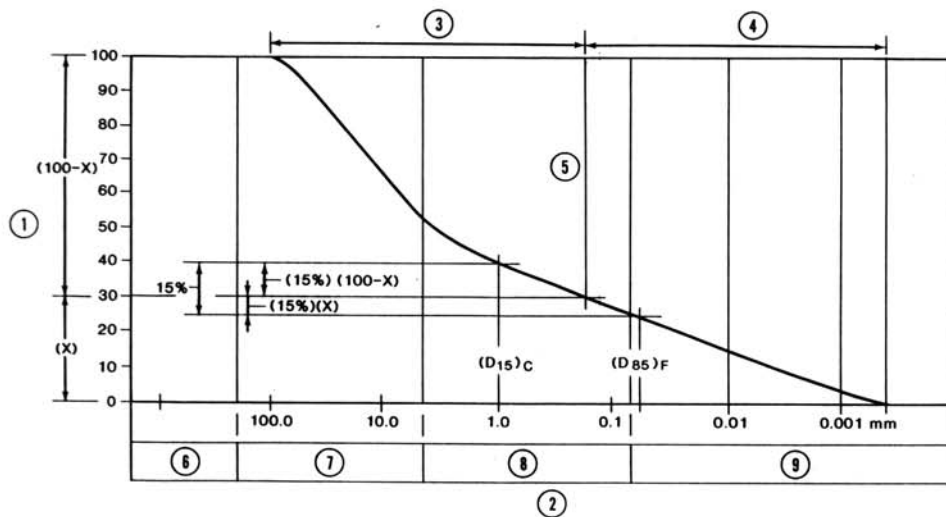
4. TECHNIQUE ACTUELLE

4.1. SPÉCIFICATIONS RELATIVES A LA CONCEPTION DES FILTRES (1)

4.1.1. Analyse du sol à protéger

Avant de concevoir un filtre, il est nécessaire d'examiner la composition granulométrique du sol à protéger. Cette analyse doit déterminer si oui ou non le matériau présente une granulométrie étalée et est susceptible d'avoir une instabilité interne. Des matériaux qui présentent une stabilité interne dans les conditions surveillées du laboratoire peuvent avoir une instabilité interne sur le terrain s'il se produit de la ségrégation, de sorte que des poches ou lentilles de granulométries différentes existent dans le remblai. Des différences substantielles de granulométrie peuvent se produire durant le déversement et l'épandage des matériaux à granulométrie étalée ou à l'interface entre des zones adjacentes, ou si le compactage est mal fait à des endroits, tels que les zones adjacentes aux appareils d'auscultation ou les tranchées.

L'évaluation par la méthode de Kenney et Lau (1985) permet de déterminer la stabilité interne du sol à protéger (voir chapitre précédent). Une autre technique proposée par Lowe (Annexe B) et par d'autres (Sherard 1979; de Mello 1975, voir Annexe B) est présentée sur la Fig. 11. Lowe mentionne (Jansen, page 270, 1988) :



(1) La granulométrie du filtre ou du matériau à protéger est la granulométrie en place, qui tient compte des effets de l'écrasement des particules, résultant du transport, de la manipulation, du compactage et des contraintes induites par le matériau sus-jacent dans le barrage, ainsi que de la contamination apportée par les eaux de surface, la poussière et les activités de construction.

4. CURRENT STATE OF PRACTICE

4.1. DESIGN REQUIREMENTS OF FILTERS (1)

4.1.1. Base soil analysis

Before a filter can be designed, the grain-size distribution curve of the base soil must be analyzed. This analysis must determine whether or not the material is broadly-graded and potentially internally unstable. Materials which may not be internally unstable in the controlled environment of the laboratory may be internally unstable in the field if segregation occurs such that pockets or lenses of differing gradations exist within the fill. Substantial differences in gradation can occur during dumping and spreading of broadly-graded materials or at the interface between adjacent zones, or if compaction is poor, such as adjacent to instrument locations or in trenches.

The evaluation by Kenney and Lau (1985) provides a means to determine the internal stability of a base soil (see previous section). An alternative technique suggested by Lowe (Appendix B) and others (Sherard, 1979; de Mello, 1975, see Appendix B) is illustrated in Fig. 11. Lowe states (Jansen, p. 270, 1988) :

Fig. 11

Criteria for self-filtering material after Lowe (Jansen, 1988).
Critères pour matériau autofiltrant d'après Lowe (Jansen, 1988).

Note : Criteria states that the D_{15} of the coarser fraction should be no more than 5 times the D_{85} of the finer fraction.

Note : Les critères précisent que le D_{15} de la fraction grossière ne doit pas être plus grand que 5 fois le D_{85} de la fraction fine.

- | | |
|------------------------------------|---|
| (1) Percent finer by weight. | (1) Pourcentage passant (en poids). |
| (2) Grain size, d, mm. | (2) Dimension des particules, d, en mm. |
| (3) Coarser fraction. | (3) Fraction grossière. |
| (4) Finer fraction. | (4) Fraction fine. |
| (5) Arbitrary point of separation. | (5) Point arbitraire de séparation. |
| (6) Cobbles. | (6) Cailloux. |
| (7) Gravel. | (7) Gravier. |
| (8) Sand. | (8) Sable. |
| (9) Silt and clay sizes. | (9) Dimensions de silt et d'argile. |

(1) Note that gradation of the filter or of the base material is the in-place gradation, which includes the effects of particle crushing as a result of transportation, handling, compaction, and the stresses imposed by overlying material in the dam; and contamination caused by surface runoff, dust, and construction activity.

« Il a été établi que les critères de Terzaghi peuvent être utilisés pour vérifier la capacité d'autofiltration des matériaux à granulométrie étalée ou à granulométrie discontinue. Les matériaux peuvent être vérifiés en séparant la courbe granulométrique en deux parties à n'importe quel point arbitraire, tel qu'illustré sur la Fig. 11. Pour un matériau autofiltrant, la dimension D_{15} de la fraction grossière doit être plus petite que 5 fois le d_{85} de la fraction fine. Il est évident, d'après la Figure, que chaque fois que la pente de la courbe granulométrique est plus douce que 15 % pour une variation de 5 fois dans la dimension des particules, le matériau n'est pas autofiltrant. Dans ce cas, le D_{15} du filtre doit être établi à partir du d_{85} de la fraction fine plutôt qu'à partir du d_{85} de l'ensemble du matériau. »

Des corrections pour le matériau à protéger ont été suggérées par ceux qui ont répondu au questionnaire et elles sont résumées ci-après :

Réponse au questionnaire	Correction pour le matériau à protéger
Norvège, Comité National	Fraction plus fine que 60 mm
Finlande, Comité National	Fraction plus fine de 20 mm
J. L. Sherard, USDA SCS, USBR	Fraction plus fine que 4,75 mm
J. Lowe (Jansen, 1988)	Analyse de la courbe granulométrique
J. Lafleur (Lafleur, et al., 1989)	Analyse de la courbe granulométrique

Ainsi qu'on peut le voir, il n'y a pas de consensus général sur la correction à faire à la granulométrie des matériaux à protéger ayant une granulométrie étalée, avant la conception du filtre adjacent.

Pour l'aménagement hydroélectrique Cat Arm au nord de Terre-Neuve, l'analyse de la distribution granulométrique de la moraine du noyau, à granulométrie étalée, a conduit à la conception d'un filtre utilisant la fraction plus fine que le tamis n° 100, soit 0,15 mm (Humphries et Connors, 1989). C'est ce qui a conduit à un filtre fin avec un D_{15} de 0,5 mm.

Ainsi, la conception de filtres appropriés commence par l'analyse du sol à protéger. Les essais de laboratoire, tels que l'essai de tamisage de Lafleur (Lafleur, 1989), peuvent être utilisés pour étudier l'effet voûte du matériau à protéger. Ceci peut apporter des clarifications supplémentaires en ce qui concerne les caractéristiques du sol à protéger.

4.1.2. Critères de rétention

Tous les ingénieurs praticiens et les chercheurs mettent un accent majeur sur la sélection des critères de rétention, c'est-à-dire « la formation de renards » ou « la stabilité interne ». Les nombreuses recommandations qui sont mentionnées le plus fréquemment dans la littérature et dans les diverses réponses au questionnaire apparaissent comme suit :

1) Pour le filtre fin adjacent au remblai imperméable ou au sol fin de fondation, utiliser un sable ou un sable-gravier avec une dimension maximale de 12,7 à 19,0 mm (1/2 à 3/4 po) et contenant 55-80 % passant le tamis n° 4. Le matériau doit avoir une bonne granulométrie entre le diamètre maximal et le sable fin, et contenir un maximum de 5 % passant le tamis n° 200. Une granulométrie de rechange est celle de l'ASTM C33, pour un sable fin à béton, comme indiqué au Tableau 3,

“ It has been found that the Terzaghi criteria can be used to check the self-filtering ability of broadly-graded and skip-graded materials. The material can be checked by separating the grain-size curve into two parts at any arbitrary point of separation, as indicated in Fig. 11. For a self-filtering material the D_{15} size of the coarser fraction should be no more than 5 times the d_{85} of the finer fraction. As is evident from the Figure, whenever the slope of the grain-size curve is flatter than 15 % per a 5 times change in grain-size, the material is not self-filtering. When such is the case, then the D_{15} of the filter should be based upon the d_{85} of the finer fraction rather than on the d_{85} of the total material. ”

Suggested adjustments to the base material by various respondents are summarized below :

Respondent	Base Material Adjustment
Norway, National Committee	Fraction finer than 60 mm
Finland, National Committee	Fraction finer than 20 mm
J. L. Sherard, USDA SCS, USBR	Fraction finer than 4.75 mm
J. Lowe (Jansen, 1988)	Analysis of gradation curve
J. Lafleur (Lafleur, et al., 1989)	Analysis of gradation curve

As can be seen, there is no common agreement on the adjustment of the gradation of a broadly- graded base material prior to design of the adjacent filter.

For the Cat Arm hydroelectric development in northern Newfoundland, the analysis of the gradation distribution of the broadly-graded moraine core material led to a filter design which utilized the fraction finer than the No.100 sieve, 0.15 mm (Humphries and Connors, 1989). This resulted in a fine filter with a maximum $D_{15} = 0.5\text{mm}$.

Thus, the design of appropriate filters starts with an analysis of the base soil to be protected. Laboratory tests such as the screen test by Lafleur (Lafleur, et al., 1989) may be used to study the bridging mechanism of the base material. This will provide additional insight regarding the characteristics of the base soil.

4.1.2. Retention criterion

All practicing engineers and researchers place great emphasis on the selection of the retention criterion, ie., the “ piping ” or “ stability ” criterion. The several proposals that appear most frequently in the literature and in the various responses to the questionnaire include :

- 1) For the fine filter adjacent to impervious fill or fine-grained soil foundation, use a sand or sand-gravel filter with top size of 12.7 to 19.0 mm (1/2 to 3/4 inches) with 55-80 % passing the No. 4 sieve. The material should be well-graded from the maximum particle size to the fine sand sizes with no more than 5 % passing the No.200 sieve. An alternative gradation is the ASTM C33 gradation for fine concrete aggregate, as shown in Table 3 below. Fine sand sizes should be used for

ci-dessous. Des sables fins doivent être utilisés dans le cas des sols dispersifs. Ceci se traduit par une dimension D_{15} variant de 0,2 à 0,5 mm approximativement (Annexe B, réponses de Ripley et Lowe).

Tableau 3
Granulométrie - Granulat fin à béton

Tamis ASTM		% passant par poids
9,50 mm	3/8 po	100
4,75 mm	n° 4	95-100
2,36 mm	n° 8	80-100
1,18 mm	n° 16	50-85
0,60 mm	n° 30	25-60
0,30 mm	n° 50	10-30
0,15 mm	n° 100	2-10

2) Utiliser la relation classique de Terzaghi,

$$D_{15}/d_{85} < 4, \text{ ou } < 5 \text{ (US Army COE, 1986)}$$

après correction appropriée de la forme de la courbe granulométrique du sol à protéger. La sélection de la dimension du d_{85} résulte de l'analyse de la courbe granulométrique du sol à protéger. La méthode de Lafleur discutée précédemment fait partie de cette catégorie.

3) Utiliser la méthode mise au point par Sherard et ses collaborateurs de l'US Soil Conservation Service (Sherard, et al., 1989). Dans cette méthode, le matériau à protéger est corrigé et classé selon les nécessités. Ensuite, le filtre est conçu en conformité avec les règles énoncées dans le guide (USDA SCS, 1986).

Pour les projets importants ou pour les projets utilisant des matériaux suspects, il est prudent de réaliser une série d'essais de filtre en laboratoire pour justifier la sélection du filtre le plus approprié. En présence de sols dispersifs, des essais de laboratoire doivent être réalisés. L'utilisation des critères développés par l'USDA SCS 1986, c'est-à-dire un filtre de sable ayant un D_{15} entre 0,1 et approximativement 0,3 mm, assure, dans la majorité des cas, un filtre adéquat pour les sols dispersifs. En fait, un filtre grossier ayant un $D_{15} > 0,3$ mm a été utilisé, c'est-à-dire jusqu'à 0,5 mm sans problème, avec des sols dispersifs après vérification au moyen de l'essai de filtre sans érosion (Post, Annexe B).

4.1.3. Critères de perméabilité

Le filtre doit évacuer les percolations provenant du remblai et de la fondation adjacents sans développer des pressions interstitielles excessives. La recommandation la plus citée et la plus utilisée est la relation de Terzaghi :

$$D_{15}/d_{15} > 4 \text{ ou } > 5 \text{ (US Army COE, 1986).}$$

Cette relation assure un rapport de perméabilité d'environ 20 entre le filtre et le matériau à protéger adjacent, puisque la perméabilité varie approximativement avec le carré de D_{15} . En plus de ce critère, l'US Soil Conservation Service (USDA SCS, 1986) ajoute l'exigence que le D_{15} ne doit pas être plus petit que 0,1 mm.

dispersive soils. This results in D_{15} sizes from about 0.2 to 0.5 mm (Appendix B, Ripley and Lowe responses).

Table 3
Gradation - Fine Concrete Aggregate

ASTM Sieve Size		% Passing by Weight
9.50 mm	3/8 "	100
4.75 mm	No. 4	95-100
2.36 mm	No. 8	80-100
1.18 mm	No. 16	50-85
0.60 mm	No. 30	25-60
0.30 mm	No. 50	10-30
0.15 mm	No. 100	2-10

2) Use the classic Terzaghi relationship,

$$D_{15}/d_{85} < 4, \text{ or } < 5 \text{ (US Army COE, 1986)}$$

after appropriate adjustment to the shape of the gradation curve of the base. The choice of the d_{85} size is based on analysis of the base gradation curve. Lafleur's procedure, discussed previously, falls into this category.

3) Use the procedure developed by Sherard and his co-workers at the US Soil Conservation Service (Sherard, et al., 1989). In this method the base material is adjusted as required and categorized. The filter is then designed according to the rules stated in the guideline (USDA SCS, 1986).

For major projects or for projects with questionable materials, it is prudent to perform a series of laboratory filter tests to substantiate the selection of the most appropriate filter. Where dispersive soils are present, laboratory filter tests should be performed. Use of the criteria developed by the USDA SCS, 1986, i.e., a sand filter with D_{15} between 0.1 and about 0.3 mm will, in most cases, provide an adequate filter for dispersive soils. In fact, coarser filter with a $D_{15} > 0.3$ mm have been used, i.e., up to 0.5 mm without any problem with dispersive soils after check by the No Erosion Filter Test (Post, Appendix B).

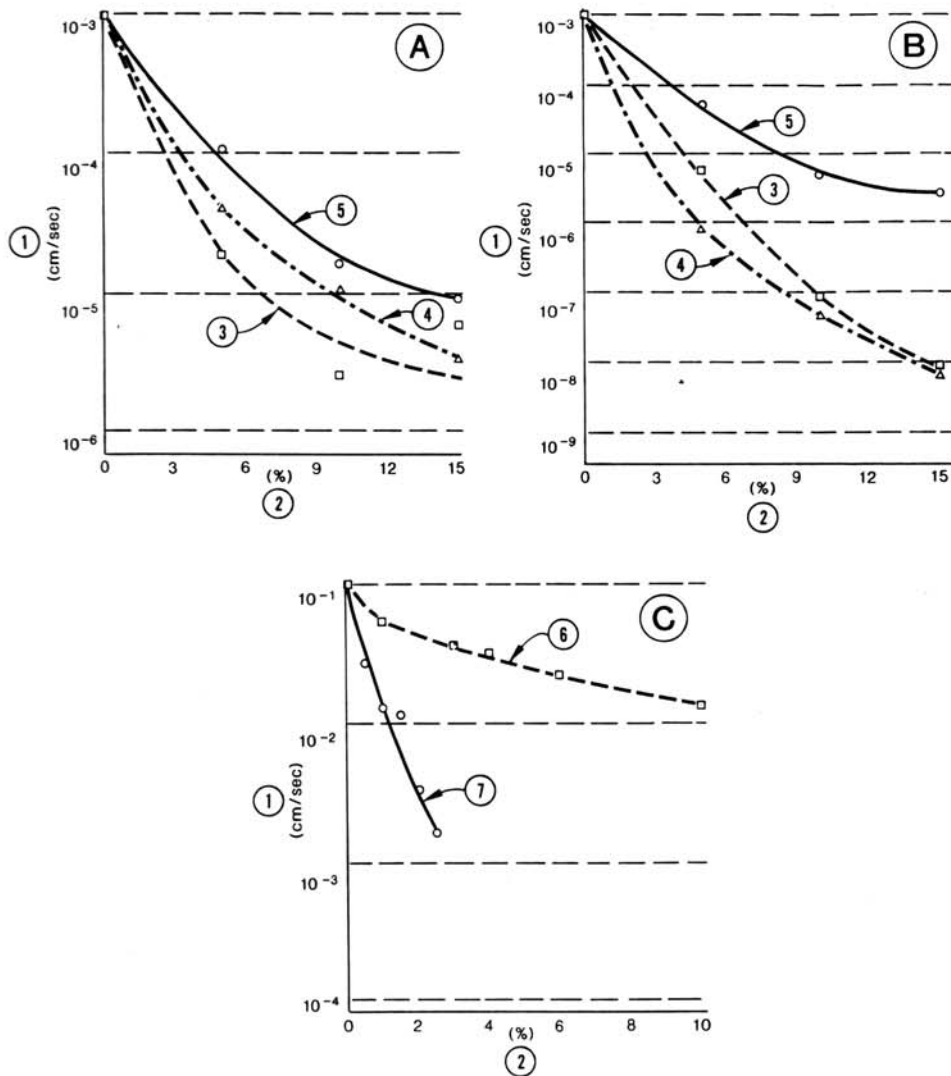
4.1.3. Permeability criterion

The filter must accept seepage from the adjacent embankment or foundation without the build-up of excess pore pressure. The guideline most often quoted and used is the Terzaghi relationship :

$$D_{15}/d_{15} > 4, \text{ or } > 5 \text{ (US Army COE, 1986).}$$

This ensures a ratio of permeability of about 20 times between the filter and the adjacent base material, since permeability varies approximately with the square of the D_{15} . In addition to the above criterion, the US Soil Conservation Service (USDA SCS, 1986) adds the requirement that the D_{15} must be no finer than 0.1 mm.

Ainsi que l'indique Cedergren, même des quantités minuscules de silt ou d'argile peuvent diminuer substantiellement la perméabilité des sables (Cedergren, 1977). Comme l'illustre la Fig. 12 A, cinq pour cent de particules fines (matériau passant le tamis n° 200) composées de silt ou d'argile réduisent la perméabilité du sable à béton d'environ 1,5 ordre de grandeur. Pour un mélange de sable-gravier, présenté sur la Fig. 12 B, la réduction sera d'environ 3 ordres de grandeur. De même, tel qu'indiqué sur la Fig. 12 C, le type de minéraux d'argile dans les fines est important pour la diminution de la perméabilité du sable fin uniforme (US Army Corps of Engineers, 1986).



As indicated by Cedergren, even minute quantities of silt or clay can greatly diminish the permeability of sands (Cedergren, 1977). As shown in Fig. 12 A, five percent fines (material smaller than the No. 200 sieve) composed of silt or clay will decrease the permeability of a concrete sand about 1 1/2 orders of magnitude. For a sand-gravel mixture, shown in Fig. 12 B, the decrease would be about three orders of magnitude. Also, as shown in Fig. 12 C, the type of clay mineral in the fines is important in determining the decrease in permeability of uniform fine sand (US Army Corps of Engineers, 1986).

Fig. 12

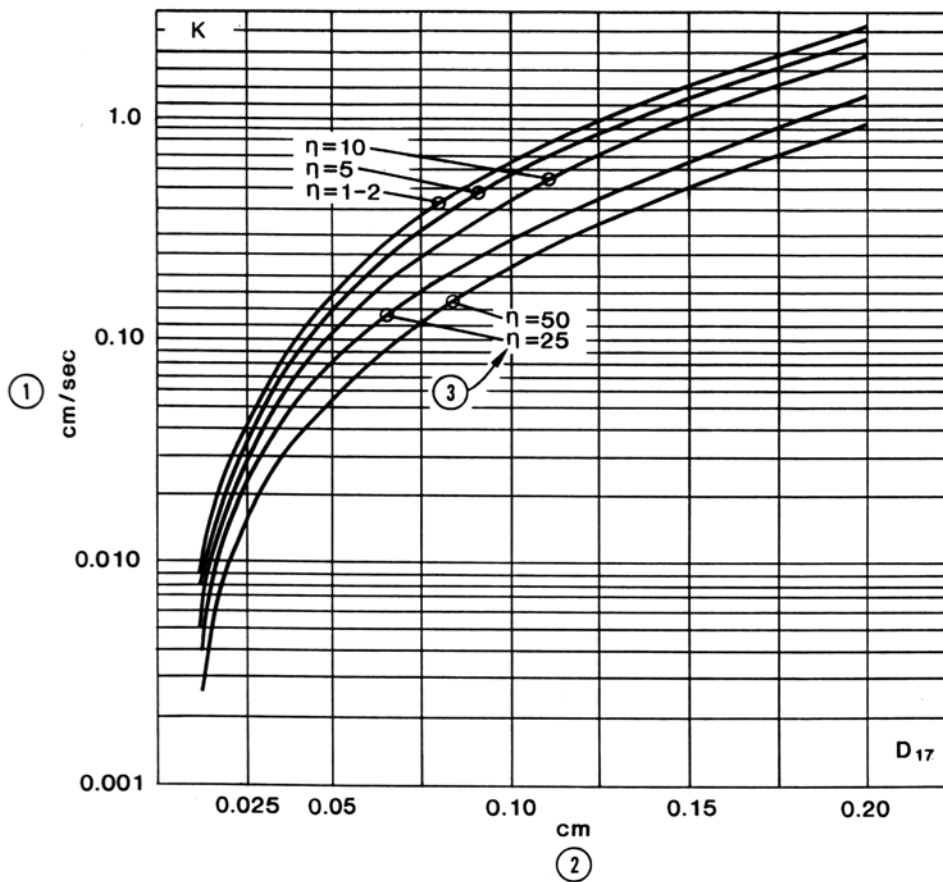
Influence of type and amount of fines on permeability of concrete sand, sand-gravel mixture, and uniform fine sand (US Army Corps of Engineers, 1986).

Influence du type et de la quantité de matériaux fins sur la perméabilité d'un sable à béton, d'un mélange sable-gravier et d'un sable fin uniforme (US Army Corps of Engineers, 1986).

- | | |
|---|--|
| <p>(A) Effect of fines on permeability of concrete sand (from Barber and Sawyer).</p> <p>(B) Effect of fines on permeability of sand-gravel mixture (from Barber and Sawyer).</p> <p>(C) Effect of fines on permeability of uniform fine sand (from Fenn).</p> <p>(1) Coefficient of permeability, cm/s.</p> <p>(2) Percent of fines.</p> <p>(3) Silt.</p> <p>(4) Clay.</p> <p>(5) Limestone.</p> <p>(6) Kaolinite.</p> <p>(7) Calcium montmorillonite.</p> | <p>(A) <i>Effet des matériaux fins sur la perméabilité du sable à béton (d'après Barber et Sawyer).</i></p> <p>(B) <i>Effet des matériaux fins sur la perméabilité du mélange sable et gravier (d'après Barber et Sawyer).</i></p> <p>(C) <i>Effet des matériaux fins sur la perméabilité du sable fin uniforme (d'après Fenn).</i></p> <p>(1) <i>Coefficient de perméabilité, cm/s.</i></p> <p>(2) <i>Pourcentage de matériaux fins.</i></p> <p>(3) <i>Silt.</i></p> <p>(4) <i>Argile.</i></p> <p>(5) <i>Calcaire.</i></p> <p>(6) <i>Kaolinite.</i></p> <p>(7) <i>Montmorillonite calcaire.</i></p> |
|---|--|

La perméabilité diminue aussi avec l'augmentation du coefficient d'uniformité C_u , Fig. 13.

On doit clairement préciser dans les spécifications techniques une limite au pourcentage de matériau passant le tamis n° 200, mesuré sur des échantillons prélevés après compactage. En se basant sur les réponses reçues, un pourcentage variant de deux à environ sept, en poids de matériaux non plastiques, est en général accepté en fonction des caractéristiques de la zone d'emprunt. Une limite maximale de cinq pour cent est le plus fréquemment utilisée.



Pour les ouvrages importants, des essais de perméabilité en laboratoire doivent être réalisés sur tous les matériaux pour assurer que les granulométries spécifiées sont acceptables.

4.1.4. Capacité d'évacuation

Il est impératif que les systèmes de filtre et de drain dans les barrages en remblai évacuent en toute sécurité la totalité des eaux d'infiltration vers le pied

Permeability also decreases with increasing Uniformity Coefficient, C_u , Fig. 13.

A limit on the percentage of minus No. 200 material, determined on samples taken after compaction, should be clearly stated in the specifications. Based on the responses, percentages from two to about seven percent by weight of non-plastic fines are currently allowed depending on the characteristics of the material source. A five percent maximum limit is most often used.

Fig. 13

Permeability of sandy and gravelly materials versus the D_{17} size of the material and its uniformity coefficient (Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, 1974).

Perméabilité des matériaux sableux et graveleux en fonction de la dimension D_{17} du matériau et de son coefficient d'uniformité (Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, 1974).

- (1) Coefficient of permeability.
- (2) D_{17} size of the material.
- (3) Uniformity coefficient, C_u .

- (1) Coefficient de perméabilité.
- (2) Dimension D_{17} du matériau.
- (3) Coefficient d'uniformité, C_u .

For important structures, laboratory permeability tests should be performed on all materials to ensure that the specified gradations are acceptable.

4.1.4. Discharge capacity

It is imperative that filter and drainage systems within embankment dams safely conduct all seepage water to the downstream toe or to an adjacent more

aval ou vers une zone adjacente plus perméable sans développer de pressions excessives. La conception du système de drainage doit considérer le scénario le plus défavorable, incluant la fissuration du noyau, la fracturation hydraulique et/ou une ségrégation dans le noyau. Avec une grande capacité d'évacuation, la ligne d'écoulement ne s'élèvera pas au-dessus du drain horizontal aval relié au drain-cheminée. Dans sa réponse au questionnaire, Cedergren précise :

« Je crois que ceci constitue le sujet le plus important du Bulletin, du fait que plusieurs barrages à travers le monde ont été construits dans les dernières 20-30 années (même encore actuellement) avec des drains insuffisants pour évacuer les eaux de percolation sans développer des hautes pressions. La plupart des concepteurs semblent penser que si le filtre ou le drain est conçu de façon que le D_{15} du filtre (ou du drain) soit au moins 4 ou 5 fois le d_{15} du sol à protéger, il dispose d'une capacité d'évacuation adéquate.

... Alors qu'il existe de nombreux moyens d'analyser l'écoulement dans les filtres et les drains, l'un des plus simples à utiliser (après que le débit probable d'écoulement ait été évalué) est la loi de Darcy sous la forme :

$$Q/i = kA$$

Dans cette équation, Q est le débit estimé d'écoulement qui doit être évacué par le filtre ou le drain (par unité de longueur de la structure), i est le gradient hydraulique admissible (disponible) dans le filtre ou le drain, k est le coefficient de perméabilité requis du filtre ou du drain ayant une surface A perpendiculaire à la direction d'écoulement dans le filtre ou le drain. Toutes les combinaisons de K et A qui assurent la capacité d'évacuation (avec un coefficient de sécurité adéquat) peuvent être acceptées. En général, des couches relativement minces d'un matériau de forte perméabilité sont plus économiques que des couches épaisses de perméabilité plus faible (dans la partie importante des drains). »

Le coefficient de sécurité dépend :

- 1) Du conservatisme du scénario le plus défavorable de fissuration du noyau, avec lequel on a estimé le débit d'écoulement à travers l'ouvrage,
- 2) De la perméabilité *in situ* du système de filtre et de drain, et de la variation de cette perméabilité avec la quantité de particules fines qu'on y trouve après compactage,
- 3) De l'anisotropie de la perméabilité dans le système, de la perméabilité verticale pour le drain-cheminée, de la perméabilité horizontale pour le tapis et les drains en forme d'antenne.

Dans le cas des sables et graviers, un écoulement turbulent peut se produire et un facteur de réduction, indiqué sur la Fig. 14, doit être appliqué à la perméabilité déjà évaluée. La perméabilité du matériau des drains, après mise en place, doit être au moins vingt fois la perméabilité requise évaluée, c'est-à-dire présenter un coefficient de sécurité de vingt par rapport à la perméabilité réelle.

pervious zone without the buildup of excess pressure. Design of drainage systems should consider a worst-case scenario that includes core cracking, hydraulic fracture, and/or core segregation. With ample discharge capacity, the line of seepage will not rise above the horizontal downstream drain connecting to the chimney drain. In his response to the questionnaire, Cedergren states :

“ I believe this is one of the most important topics for the Bulletin, because many dams throughout the world have been built in the past 20-30 years (and even now) with drains incapable of removing seepage without large buildup of pressure. Most dam designers seem to believe that if a filter or drain is designed so that the D_{15} of the filter (or drain) is at least 4 or 5 times the d_{15} of a protected soil it will have adequate discharge capacity.

... While there are a number of ways of analyzing flow in filters and drains, one of the simplest to use (after potential flow rates have been estimated) is Darcy's law in the form :

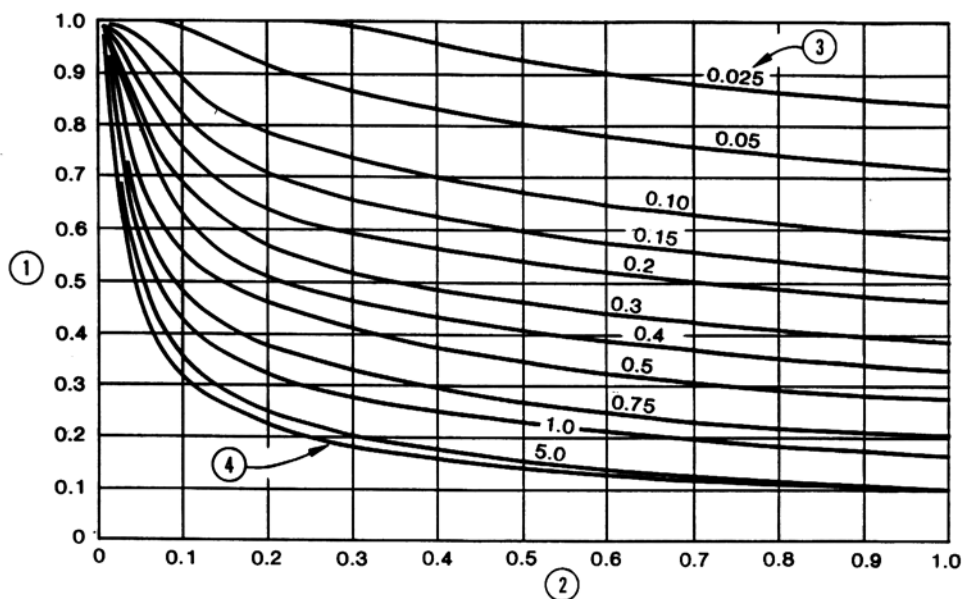
$$Q/i = kA$$

In this equation, Q is the estimated rate of flow which must be handled by the filter or drain (per unit length of structure), i is the allowable (available) hydraulic gradient in the filter or drain, k is the required coefficient of permeability of the filter or drain having an area, A, normal to the direction of flow in the filter or drain. Any practical combination of k and A that ensures the required discharge capacity (with an adequate factor of safety) can be used. Generally, relatively thin layers of highly permeable materials are more economical than thicker layers of lower permeability material (in the conducting elements of drains). ”

The safety factor depends on :

- 1) The conservatism of the worst cracking scenario with which the flow through the core has been estimated,
- 2) The measured *in situ* permeability of the filter and drain system and the variation of permeability with the amount of fines after compaction,
- 3) The anisotropic permeability characteristics of the system, vertical permeability for the chimney drain, horizontal permeability for blanket and finger drains.

For sands and gravels, turbulent flow may occur and a reduction factor, shown in Fig. 14, should be applied to the estimated permeability. The permeability of the drain material after placement should be at least twenty times the estimated required permeability, i.e. a factor of safety of twenty with respect to permeability. Smaller factors of safety may be used if the worst cracking scenario is considered.



La Fig. 15, tirée de l'annexe à la norme de conception d'USBR (USBR, 1987), met l'accent sur la nécessité d'évaluer la capacité d'évacuation des systèmes de filtre et de drain.

La capacité de drainage interne peut être augmentée substantiellement par l'utilisation de tuyaux collecteurs perforés, bien protégés par du matériau filtre grossier. L'utilisation de tuyaux collecteurs doit être évitée si les tuyaux peuvent être endommagés par la corrosion ou subir d'autres dommages (voir Jansen, Annexe B). Des allongements et/ou des séparations aux joints du tuyau peuvent avoir lieu si le tuyau est placé sur une fondation compressible et couvert par un remblai. Les tuyaux drainants sont utilisés la plupart du temps dans des puits de décharge des pressions et dans des tranchées de drainage au pied aval du barrage. Dans les cas où il est approprié d'utiliser des tuyaux perforés collecteurs, on peut utiliser les critères de rétention suivants pour adapter la dimension des trous ou des fentes à la granulométrie du filtre grossier entourant la conduite :

$$D_{85}/\text{Ouverture max. du tuyau} > 2 \text{ (USBR, 1987)}$$

$$D_{50}/\text{Diamètre du trou} > 1,0$$

$$D_{50}/\text{Largeur de la fente} > 1,2 \text{ (US Army COE, 1986).}$$

Les critères précités sont applicables aux filtres grossiers relativement uniformes c'est-à-dire ayant un coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10}$ approximativement égal à 5 ou moins. Hadj-Hamou, et al., 1990, ont fait des essais dans un programme expérimental de laboratoire, à la fois sur des filtres à granulométrie étalée et des filtres à granulométrie uniforme, destinés à des puits de décharge des pressions. Pour qu'il se produise un minimum de pénétration du matériau filtre

Fig. 14

Approximation for estimating reduction in permeability of uniform aggregate caused by turbulent flow (Cedergren, 1989).

Évaluation approximative de la réduction de la perméabilité de granulats uniformes par un écoulement turbulent (Cedergren, 1989).

- | | |
|---|--|
| (1) Reduction factor. | (1) Facteur de réduction. |
| (2) Hydraulic gradient, <i>i</i> . | (2) Gradient hydraulique, <i>i</i> . |
| (3) Effective grain size, in inches. | (3) Dimension de particule effective, en pouces. |
| (4) Limiting envelope, complete turbulence. | (4) Enveloppe limitée, turbulence totale. |

Fig. 15, taken from an appendix to the USBR design standard (USBR, 1987), emphasizes the need to evaluate the discharge capacity of filter and drainage systems.

Internal drainage capacity can be increased dramatically with the use of perforated collector pipes, properly protected with coarse filter material. Pipe collectors should be avoided in situations where corrosion or other damage to the collector can occur (see Jansen, Appendix B). Pipe extension and/or pipe separation at joints can occur if pipe is placed on a compressible foundation and is buried under a high fill. Pipe drains are most often used in relief wells or drainage trenches at the downstream toe of the dam. In situations where it is appropriate to use perforated collector pipes, the following retention criteria can be used to relate hole or slot size to the gradation of the coarse filter surrounding the pipe :

$$D_{85}/\text{Max. pipe opening} > 2 \text{ (USBR, 1987)}$$

$$D_{50}/\text{Hole diameter} > 1.0$$

$$D_{50}/\text{Slot width} > 1.2 \text{ (US Army COE, 1986).}$$

The above criteria are valid for relatively uniform coarse filters, i.e. Uniformity Coefficient, $C_u = D_{60}/D_{10}$, equal to approximately 5 or less. Hadj-Hamou, et al., 1990, tested both widely graded and uniform filters for relief wells in a laboratory experimental program. For minimum wash-in of filter material during well development, the slot size of the well screen should be equal to the D_{10} size of the filter. For critical structure drains where rapid gradient reversal (surging) is

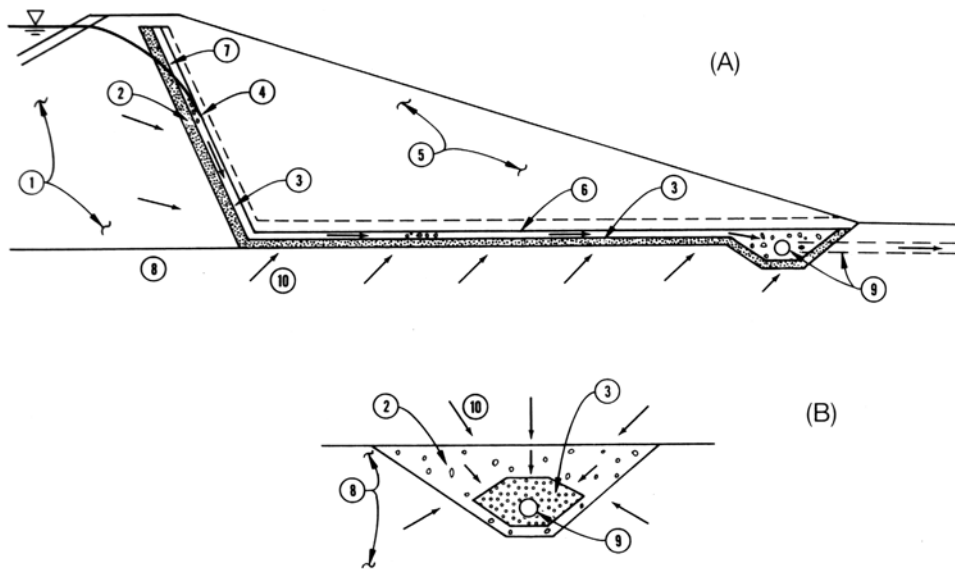


Fig. 15

Filter and transmissibility needs of drains in embankment dams (USBR, 1987).

Qualités de filtration et de perméabilité exigées des drains dans les barrages en remblai (USBR, 1987).

- (A) Dam with "chimney" drain and outlet blanket drain. Seepage flows across large areas of filters into coarse drainage layers. Standard filter criteria normally assures filters "somewhat" more permeable than drained soils. Hydraulic calculations are essential to estimate the required thickness/width and permeability of the drain zone. The Darcy equation, $q = kit$, should be used, where

q = seepage flow rate in the drain layer, m^3/s ,

k = coefficient of permeability of the drain layer, m/s ,

i = hydraulic gradient in the drain layer,

t = thickness or width of the drain layer, m .

All values are per meter of dam.

- (B) Toe drain or trench drain. Seepage converges across filter and drain zone to reach pipe. Hydraulic calculations are needed to estimate the requirements of both zones.

- (1) Compacted earth fill.
- (2) Fine filter.
- (3) Drainage layer.
- (4) Fine filter or transition material.
- (5) Random fill.
- (6) Outlet blanket drain.
- (7) Chimney drain.
- (8) Foundation material.
- (9) Outlet pipe.
- (10) Direction of seepage flow.

- (A) Barrage avec drain-cheminée et tapis aval drainant. L'infiltration s'écoule à travers de grandes surfaces du filtre dans les couches de drainage grossières. Les critères standard de filtre assurent normalement des filtres un peu plus perméables que les sols à drainer. Des calculs hydrauliques sont nécessaires pour évaluer l'épaisseur/largeur et la perméabilité requises de la zone drainante. L'équation de Darcy, $q = kit$, est à utiliser, où

q = débit d'infiltration dans la couche drainante, m^3/s ,

k = coefficient de perméabilité de la couche drainante, m/s ,

i = gradient hydraulique dans la couche drainante,

t = épaisseur ou largeur de la couche drainante, m .

Toutes ces valeurs se réfèrent au mètre linéaire de barrage.

- (B) Drain de pied ou tranchée de drainage. L'infiltration converge à travers des zones de filtre et drain vers le tuyau. Des calculs hydrauliques sont requis pour évaluer les exigences des deux zones.

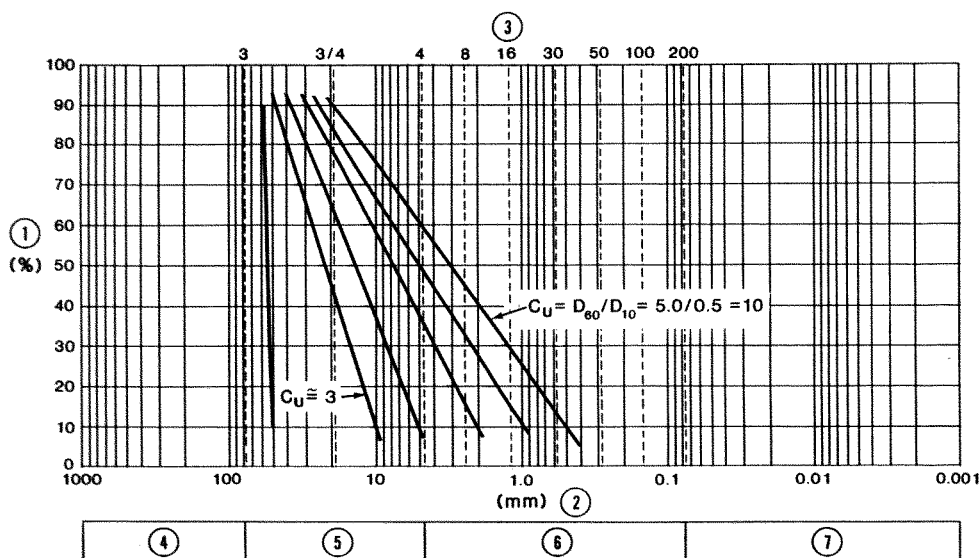
- (1) Remblai de terre compactée.
- (2) Filtre fin.
- (3) Couche drainante.
- (4) Filtre fin ou matériau de transition.
- (5) Remblai tout-venant.
- (6) Couche drainante d'évacuation.
- (7) Drain-cheminée.
- (8) Matériau de fondation.
- (9) Tuyau d'évacuation.
- (10) Direction de l'écoulement.

dans le puits, la largeur de la fente de la pointe filtrante doit être égale au D_{10} du filtre. Dans le cas de structures critiques où un renversement de gradient hydraulique est possible, on recommande que le D_{15} du matériau filtre entourant le tuyau ne soit pas plus petit que les trous dans le tuyau (USDA SCS, 1986).

4.1.5. Ségrégation

Les matériaux de filtre ou drain ne doivent pas présenter de ségrégation pendant la construction. La production, la manutention, le stockage, la ré-excavation, le déversement, l'épandage ou le compactage du matériau doivent être réalisés en minimisant la ségrégation. Les méthodes de construction doivent être spécifiées, planifiées, exécutées et vérifiées par un processus continu d'inspection et d'essais *in situ* pour s'assurer que la ségrégation ne compromet pas l'efficacité du filtre ou du drain.

La granulométrie du filtre doit être assez uniforme pour empêcher la ségrégation. Les normes de conception actuelles de l'US Soil Conservation Service (USDA SCS, 1986) et du Bureau of Reclamation (USBR, 1987) comprennent les critères présentés au Tableau 4 qui sont utilisés suivant les directives indiquées sur le Tableau 2. La Fig. 16 présente ces critères sous forme graphique. On peut observer que les filtres grossiers doivent présenter une granulométrie plus uniforme pour éviter la ségrégation pendant la construction. Les coefficients d'uniformité recommandés varient approximativement entre 6 pour les filtres constitués de sable avec quelques particules de gravier à environ 3 pour les filtres grossiers ou les drains avec une dimension maximale des particules d'environ 75 mm (3 po). Lors de l'utilisation de filtres minces, c'est-à-dire de l'ordre de 1 m ou moins, un contrôle rigoureux de la ségrégation est obligatoire.



L'utilisation de la procédure de l'US Soil Conservation Service peut conduire à la conception d'un filtre avec une grande plage de dimensions permettant l'emploi de matériaux à granulométrie discontinue. Ces matériaux présentent une courbe

probable, it is recommended that the D_{15} size of the material surrounding the pipe be no smaller than the perforation size (USDA SCS, 1986).

4.1.5. Segregation

Filter or drain material must not segregate during construction. The processing, handling, stockpiling, re-excavation, dumping, spreading, or compaction of the filter material must be carried out to minimize segregation. Construction methods must be specified, planned, executed, and confirmed by continuous inspection and field testing to assure that segregation does not compromise filter or drain performance.

The filter gradation must be sufficiently uniform to preclude segregation. The current design standards of the US Soil Conservation Service (USDA SCS, 1986) and the US Bureau of Reclamation (USBR, 1987) include the criteria presented in Table 4 which are to be used with the guidelines shown on Table 2. These criteria are presented in graphical form in Fig. 16. As can be seen, the coarser filters must be more uniformly graded to avoid segregation during construction. The recommended Uniformity Coefficient varies from about 6 for filters consisting of sand with some gravel sized particles to about 3 for coarse filters or drains with top sizes on the order of 75 mm (3 inches). When thin filters are used, i.e. on the order of 1 m or less, close control of segregation is mandatory.

Fig. 16

Graphical presentation of SCS segregation criteria.
Représentation graphique des critères de ségrégation SCS.

- | | |
|------------------------------|---|
| (1) Percent finer by weight. | (1) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (2) Grain size in mm. | (2) <i>Dimension des particules, en mm.</i> |
| (3) US standard sieve size. | (3) <i>Tamis standard US.</i> |
| (4) Cobbles. | (4) <i>Cailloux.</i> |
| (5) Gravel. | (5) <i>Gravier.</i> |
| (6) Sand. | (6) <i>Sable.</i> |
| (7) Silt or clay. | (7) <i>Silt et argile.</i> |

The use of the US Soil Conservation Service procedure can lead to the design of a filter with a broad range of particle sizes that could result in allowing the use of gap-graded materials. These materials have a grain size distribution curve with

granulométrique avec des cassures ou d'autres caractéristiques indésirables et peuvent être sujets à une ségrégation durant la mise en place. L'US Soil Conservation Service est en train d'achever la révision de ses critères de conception pour les filtres de sable et gravier (Talbot, Annexe B). Les critères suivants ont été ajoutés à l'étape finale :

1) Ajuster les limites de telle sorte que les côtés fin et grossier de la zone granulométrique du filtre aient un coefficient d'uniformité de 6 ou moins.

2) Ajuster les limites de sorte que la largeur de la zone granulométrique du filtre permette d'établir un rapport des diamètres maxima aux diamètres minima de 5 ou moins, pour n'importe quel pourcentage de particules passant de 60 ou moins.

Tableau 4

**Limites de D_{10f} et D_{90f} pour prévenir la ségrégation
(USDA SCS, 1986; USBR, 1987)**

Minimum D_{10} mm	Maximum D_{90} mm
< 0,5	20
0,5-1,0	25
1,0-2,0	30
2,0-5,0	40
5,0-10	50
10-50	60

4.1.6. Autocicatrisation par effondrement

Les matériaux de filtre et de drain doivent être non cohérents et avoir la capacité d'effondrement et d'autocicatrisation lors du développement d'une fissure, même si le noyau adjacent a subi des dommages par fissuration. Vaughan (1982) propose l'utilisation de l'essai « château de sable » pour vérifier la cohésion.

« Un essai simple, utilisable dans les laboratoires de chantier, a été mis au point pour évaluer la cohésion du filtre. Il consiste à préparer des échantillons cylindriques ou coniques de matériau de filtre humide et à les compacter, soit dans un moule de compactage, soit dans un petit seau semblable à celui utilisé par les enfants sur la plage; à placer l'échantillon dans une cuvette peu profonde (si on utilise un seau, l'opération est semblable à la construction d'un château de sable par un enfant) et à remplir soigneusement la cuvette avec de l'eau. Si l'échantillon s'effondre à son angle de repos au fur et à mesure que l'eau monte et change l'effet de la succion capillaire dans le filtre, le matériau est non cohérent. Des échantillons peuvent être stockés pour différentes périodes de temps afin de vérifier si la cohésion ne se développe pas avec le temps. Cet essai est en fait un essai de compression réalisé à une contrainte effective de confinement de zéro et à une contrainte de cisaillement très faible, et est ainsi un détecteur très sensible d'un faible degré de cohésion. »

Le matériau de filtre ou de drain ne doit pas développer une cohésion ou une cimentation avec le temps. Certains matériaux peuvent développer de la cohésion

sharp breaks or other undesirable characteristics and may be susceptible to segregation during placement. The US Soil Conservation Service is nearing the completion of a revision to their criteria for the design of sand and gravel filters (Talbot, Appendix B). The following criteria will be added as a final step :

1) Adjust the limits so that the coarse and fine sides of the filter band have a Uniformity Coefficient of 6 or less.

2) Adjust the limits so that the width of the filter band results in a ratio of maximum diameters to minimum diameters of 5 or less, at any given percent passing of 60 or less.

Table 4
 D_{10} and D_{90} Limits to Prevent Segregation
(USDA SCS, 1986; USBR, 1987)

Minimum D_{10} mm	Maximum D_{90} mm
< 0.5	20
0.5-1.0	25
1.0-2.0	30
2.0-5.0	40
5.0-10	50
10-50	60

4.1.6. Self-healing by collapse

Filter and drain material must be cohesionless and be capable of collapse and self-healing should cracking occur even though an adjacent core zone may have been damaged by cracking. Vaughan (1982) suggests the use of the “ sand castle ” test for cohesion.

« A simple test, suitable for use in a field laboratory, has been devised to examine filter cohesion. It consists of forming a cylindrical or conical sample of moist compacted filter, either in a compaction mould, or in a small bucket such as is used by a child on a beach; standing the sample in a shallow tray (if a bucket is used the operation is exactly as building a child’s sand castle) and carefully flooding the tray with water. If the sample then collapses to its true angle of repose as the water rises and destroys the capillary suctions in the filter, then the filter is noncohesive. Samples can be stored for varying periods to see if cohesive bonds form with time. This test is, in effect, a compression test performed at zero effective confining pressure and a very small shear stress, and it is a very sensitive detector of a small degree of cohesion. »

Filter or drain material should not gain cohesion or “ cement ” with time. Certain materials may gain cohesion with time and access to moisture. As Vaughan

avec le temps et en présence d'humidité. Comme le suggère Vaughan, l'essai « château de sable » peut être utilisé pour évaluer la tendance du matériau filtre à développer une cohésion avec le temps. Le critère de l'US Soil Conservation Service (USDA SCS, 1986), $D_{15} \geq 0,1 \text{ mm}$, assure aussi un filtre non cohérent à moins qu'il y ait présence de fines argileuses ou de ciment de carbonate.

4.1.7. Capacité de colmatage d'une fissure dans le noyau

Puisqu'il n'existe aucun moyen de s'assurer *a priori* que le noyau ne se fissurera pas, la capacité du matériau filtre à contrôler une fuite concentrée à travers le matériau du noyau doit être établie par les essais USDA SCS - Essai de non-érosion (Sherard et Dunnigan, 1985, 1989), en utilisant le D_{15} du filtre envisagé comme une mesure quantitative de sa capacité à contrôler et à colmater une fuite concentrée à travers le noyau. La validité de cette approche a été vérifiée de façon indépendante par les études de E. Maranha das Neves (Annexe B).

4.1.8. Qualité

En général, un filtre ou drain de bonne qualité est constitué de particules dures et durables qui ne se désagrègent pas sous l'effet des agents chimiques, physiques ou biologiques. Un matériau qui :

- 1) développe de la cohésion ou se cimente dans le temps par suite d'attaque chimique ou biologique,
- 2) change de granulométrie lors des opérations de production, mise en place et compactage,
- 3) change de granulométrie dans le temps sous l'effet du phénomène de gel-dégel,
- 4) change de granulométrie sous l'effet des contraintes de compression ou de cisaillement qui existent particulièrement dans la partie inférieure du remblai des grands barrages,

doit être évité. Les méthodes d'essai utilisées normalement pour évaluer la bonne qualité des sources potentielles de granulats à béton doivent être adoptées aussi pour le matériau filtre. Les essais granulométriques de laboratoire doivent comprendre le lavage de l'échantillon en vue de déterminer le pourcentage de particules passant le tamis n° 200. On utilise des essais sur le chantier, comprenant des essais de granulométrie, pour évaluer l'écrasement des particules causé par le compactage et la manutention.

La possibilité d'attaque des matériaux granulaires par les agents chimiques et les bactéries a été mentionnée par Elam (Annexe B). Les filtres constitués de calcaire vont subir une dégradation avec le temps dans un milieu acide; le blocage des sorties par une boue de bactéries ferriques peut se développer. Des dépôts provenant de la précipitation des solutions peuvent obstruer et cimenter les filtres, annulant ainsi la fonction du système filtre/drain. Les filtres, au barrage de Carsington, ont été endommagés par l'attaque des acides. Comme résultat, la composition granulométrique a été modifiée et la capacité d'évacuation réduite substantiellement (commentaires sur la deuxième ébauche du Bulletin, par J. A. Charles).

suggests, the “ sand castle ” test can be used to evaluate the tendency of a filter material to gain cohesion with time. The US Soil Conservation Service criterion (USDA SCS, 1986) of $D_{15} \geq 0.1$ mm also ensures a cohesionless filter, unless clayey fines or a carbonate cement is present.

4.1.7. Ability to control a crack in the core material

Since there is no way to assure *a priori* that the core will not crack, the ability of the filter material to control a concentrated leak through the core material should be determined by conducting the USDA SCS No Erosion Test (Sherard and Dunnigan, 1985, 1989) using the D_{15} size of the proposed filter material as a quantitative measure of its ability to control and seal a concentrated leak through the core. The validity of this approach was independently verified by the research of E. Maranhã das Neves (Appendix B).

4.1.8. Quality

In general, good quality filter or drain material will consist of hard, durable particles which will not degrade as a result of chemical, physical or biological action. Material which will :

- 1) gain cohesion, cement or clog with time as a result of chemical or biological attack,
- 2) change gradation as a result of the manufacturing, placement, and compaction process,
- 3) change gradation with time as a result of the freeze-thaw process,
- 4) change gradation under high compressive and shear stress as exists at the base of high embankment dams,

must be avoided. Test procedures that are normally used to evaluate the quality and soundness of potential sources for concrete aggregate should be used to test prospective filter material. Laboratory tests for gradation must include washing to determine the percentage of material passing the No. 200 sieve. Field tests, with accompanying gradation tests, are used to assess the breakdown caused by compaction and handling.

The opportunity for chemical and bacterial attack on granular materials is noted by Elam (Appendix B). Limestone rock filters in an acid environment will degrade with time; plugging of outlets with an iron bacterial slime can occur. Deposits coming out of solution can plug and cement filters, thus, destroying the function of the filter/drain system. At Carsington Dam, filters degraded from acid attack. The filter gradation changed and flow capacity reduced substantially as a result (comments on second draft of Bulletin, J. A. Charles).

4.2. PRATIQUE DE CONSTRUCTION

4.2.1. Largeur des filtres

Des essais en laboratoire et au chantier indiquent que la propriété filtrante d'un filtre de granulométrie adéquate s'exerce à l'intérieur des quelques centimètres situés près de son interface avec le matériau protégé. Des filtres minces, de l'ordre de 1 m d'épaisseur, sont utilisés si un matériau traité est disponible. L'emploi de filtres aussi minces suppose que la granulométrie et la qualité du matériau sont étroitement contrôlées à la centrale de fabrication et que la manutention et la mise en place sont réalisées soigneusement afin d'éviter la ségrégation. Des largeurs de filtre de 0,8 m (30 pouces) sont utilisées à l'aménagement de transfert d'énergie par pompage de Rocky Mountain aux États-Unis (Kleiner, Annexe B) et des largeurs de 1 m sont d'usage courant en Australie, Annexe B. Voir également les commentaires de Harlan (Annexe B) : « Il est difficile de placer des filtres minces à moins de le faire dans une tranchée verticale ou d'utiliser une boîte d'épandage, et ces filtres ne sont pas généralement acceptés dans les barrages en terre importants (effets des limites « d'arbre de Noël »). De façon générale, la largeur minimale recommandée varie de 2 à 3 m, ou même plus dans des cas particuliers (zones de tremblements de terre) » (note personnelle, Georges Post, 1993).

Lorsque des matériaux moins bien contrôlés sont utilisés, comme les matériaux tout-venant de dépôts naturels, des épaisseurs de filtre de trois mètres ou moins doivent être évitées. Ces matériaux moins bien contrôlés peuvent être affectés par la ségrégation lors de la mise en place; de plus, leur granulométrie et leur qualité sont susceptibles de varier; de telles variations sont particulièrement critiques à l'interface avec le matériau adjacent. L'adoption de larges zones de transition à granulométrie étalée devrait être évitée. Ces matériaux sont trop facilement sujets à la ségrégation lors de la manutention et de la mise en place.

Certains matériaux de filtres manufacturés (fabriqués à partir de roche concassée) présentent des particules en écailles. Cet assemblage d'écailles peut réduire les capacités du matériau de filtre à se tasser sur lui-même et à s'autocicatriser comme le ferait un matériau filtre constitué de particules naturelles arrondies. Il peut donc être nécessaire d'utiliser une zone de filtre plus large que celle normalement recommandée dans le cas d'un matériau concassé de ce type, pour assurer l'autocicatrisation (note personnelle, Melville, Afrique du Sud).

Pour les barrages en remblai soumis à de forts tremblements de terre, des déplacements ou des déformations permanentes peuvent survenir. Lors de la conception de tels ouvrages, on devrait évaluer sérieusement la largeur et l'épaisseur des filtres et des drains. Dans le cas où une zone de filtre ou de drain viendrait à être déplacée, la conception devrait assurer que la zone reste suffisamment large et épaisse pour que sa capacité hydraulique ne soit pas réduite de façon substantielle.

4.2.2. Spécifications de compactage

L'USBR (Annexe B) suggère que le compactage des filtres soit suffisant pour empêcher la liquéfaction, limiter la consolidation et donner une résistance adéquate. Un compactage excessif peut causer un bris des particules, réduire la per-

4.2. CONSTRUCTION PRACTICE

4.2.1. Width of filters

Laboratory and field tests indicate that the filtering ability of an appropriately graded filter occurs within a few centimeters of the interface with the protected material. Thin filters, on the order of 1 m wide, are used if processed material is available. Use of such thin filters assumes a material with closely controlled gradation and quality at the manufacturing plant and careful handling and placement techniques that avoid segregation. Filter widths of 0.8 m (30 inches) are used at the Rocky Mountain Pumped Storage Project in the USA (Kleiner, Appendix B) and widths of 1 m are in common use in Australia, Appendix B. See also comments by Harlan (Appendix B). "Narrow filters are difficult to place except in a vertical trench or with spreader box and are not accepted in a most critical earth dam (effect of "Christmas tree" boundary) and generally the minimum practical recommended width varies between 2 and 3 m or even more in special cases (earthquake areas)" (private communication, Georges Post, 1993).

Less controlled materials, such as unprocessed material from natural deposits, in combination with filter widths of three meters or less should be avoided. These less controlled materials will suffer segregation during placement and are likely to vary in gradation and quality; such variations are especially critical at the interface with adjacent material. Use of wide transition zones with broad material gradation should be avoided. These materials are too easily segregated during handling and placement.

Some manufactured filter (made from crushed rock) tends to be flakey. The flakiness can inhibit the requirement for the filter to collapse and self healing does not occur as readily as it would with well rounded natural filter materials. A manufactured filter having flakey material may require the filter zone to be wider than normally recommended to ensure self healing by collapse (private communication, Melville, South Africa).

Where embankment dams are subject to strong earthquake shaking, displacements or permanent deformations may occur. The design of such structures should be carefully evaluated with respect to width and thickness of filters and drains. The design should assure that if a filter or drain zone is displaced, sufficient width and thickness of that zone remains so that its hydraulic capacity is not critically reduced.

4.2.2. Compaction requirements

The USBR (Appendix B) suggests that the compaction of filters should be adequate to produce sufficient density to preclude liquefaction, to limit consolidation, and to provide adequate strength. Excessive compaction can cause

méabilité, et dans certains cas augmenter le pourcentage de particules fines au-delà des limites prescrites. Une densité relative minimale de 70 % est suggérée par l'USBR et le New South Wales Public Works Department (Annexe B) en Australie. Des essais de densité en place devraient être effectués dans la deuxième ou la troisième couche sous la surface car la vibration du matériau laisse dans un état relativement lâche la partie supérieure de la première couche. Lowe (Annexe B) suggère que les filtres soient compactés au degré de compactage nécessaire pour que leur compressibilité soit à peu près la même que celle des matériaux adjacents. De Mello (Annexe B) met en évidence l'« importance d'obtenir une déformabilité progressive » du noyau jusqu'au système filtre/drain.

Post (réponse personnelle, 1993) suggère que les prescriptions de compactage soient données séparément pour les filtres ou drains-cheminées et les tapis drainants :

1) Pour les drains-cheminées, un compactage moins poussé est généralement acceptable pour obtenir une déformation se situant entre celle du noyau et celle de la recharge de façon à atténuer les transferts de charge.

2) Dans le cas des tapis drainants, un minimum de compactage est requis pour empêcher la liquéfaction en cas de séismes.

Certains concepteurs (Kleiner, Annexe B) préfèrent prescrire le nombre de passes d'un engin de compactage spécifique. Généralement, on prescrit deux passes d'un rouleau vibrant lisse de 10 tonnes sur une couche de 30 cm d'épaisseur. Le rouleau vibrant a aussi une bonne efficacité sur les zones étroites de filtre (Seemel, Kleiner, Annexe B).

Le matériau du filtre devrait être humide au moment du compactage comme le suggèrent plusieurs réponses au questionnaire. Des précautions devraient être prises pour éviter le « gonflement » du matériau filtre à cause d'une teneur en eau beaucoup trop faible au moment du compactage. Sur plusieurs barrages, le compactage du drain-cheminée, mis en place en utilisant la méthode brésilienne d'excavation et de remplissage, se fait par addition d'eau (note personnelle, Post, 1993).

4.2.3. Problèmes de ségrégation

La ségrégation durant la mise en place est un problème courant qui conduit fréquemment à des matériaux de filtre ou de drain trop grossiers au contact avec le matériau adjacent plus fin. Il en résulte une incompatibilité entre les matériaux à l'interface.

Patrick (Annexe B) considère que la ségrégation est l'aspect le plus important à contrôler durant la mise en place du filtre, spécialement aux contacts entre matériaux adjacents. Pritchett (1985) ajoute que des matériaux présentant une forte ségrégation peuvent avoir un impact significatif sur le comportement d'un barrage en remblai.

Une boîte d'épandage a été utilisée sur plusieurs aménagements pour la mise en place du filtre et on a obtenu de bons résultats pour séparer et maintenir un bon contrôle de l'interface entre des filtres constitués de deux zones distinctes et au contact avec les matériaux adjacents (Fig. 17).

particle breakdown, reduce permeability, and in some cases increase the percent of fines to an amount greater than the specified limits. A minimum 70 % relative density is suggested by the USBR and the New South Wales Public Works Department (Appendix B) in Australia. Density tests of in-place material should be made in the second or third lift below the current surface because the vibration of the material leaves the upper part of the first lift in a relatively loose state. Lowe (Appendix B) suggests that filters should be compacted to the degree necessary to have their compressibility approximately the same as that of the adjacent materials. De Mello (Appendix B) emphasizes the “importance of transitioning of deformability” from core to chimney filter/drain systems.

Post (private communication, 1993) suggests that compaction requirements should be specified separately for chimney filter or drain and for drainage blankets :

1) For chimney drain, lower compaction is generally acceptable to obtain a deformability transition between core and shell and to reduce load transfer.

2) For drainage blanket, a minimum compaction is required to preclude liquefaction in case of earthquake.

Some designers (Kleiner, Appendix B) prefer to specify a number of passes of a specific piece of compaction equipment. Commonly, two passes of a ten-ton smooth-drum vibratory roller on a 30 cm lift is specified. The vibratory sled compactor also works well on narrow filter zones (Seemel, Kleiner, Appendix B).

Filter material should be moist at the time of compaction as suggested by several responses. Care should be taken to avoid “bulking” of the filter material. On many dams, compaction of the chimney drain, placed by the Brazilian “trench and fill” method, is achieved by water sluicing (private communication, Post, 1993).

4.2.3. Segregation problems

Segregation during placement is a common problem that often results in overly coarse filter and drain material in contact with an adjacent finer material. Incompatibility at the interface between materials is the result.

Patrick (Appendix B) considers that segregation is the most important control aspect during filter construction especially at the contacts between adjacent materials. Pritchett (1985) considers that severely segregated materials can have a significant bearing on the ultimate performance of the embankment dam.

Spreader boxes have been used at many projects for filter placement and have achieved good results in isolating and maintaining good control on the contact between two stage filters and on the contact with adjacent materials (Fig. 17).

La ségrégation du matériau de base ou d'un filtre à granulométrie étalée est inévitable comme le fait ressortir Ripley (Annexe B). L'USDA SCS et l'USBR, ainsi que Lowe, Ripley et Marulanda, suggèrent une ou les deux approches suivantes pour minimiser la ségrégation du matériau du filtre :

- 1) Utiliser des filtres à granulométrie uniforme et étroite,
- 2) Limiter la grosseur maximale des particules du filtre.

Si le critère de l'USDA SCS pour le contrôle du D_{90} en fonction du D_{10} est utilisé pour choisir la granulométrie (Fig. 16), le problème de ségrégation du filtre ne devrait normalement pas survenir.

Le procédé de manutention du matériau est une cause fréquente de ségrégation. Lorsque le matériau est placé en tas à la sortie du transporteur, ou chargé à partir d'une chute ou d'une trémie, les plus grosses particules peuvent rouler au pied du tas ou à l'intérieur de la benne du transporteur. La ségrégation survient également lorsque le matériau est déversé sur le remblai. L'utilisation de « rock ladders », de boîtes d'épandage et de trémies pour le chargement du matériel de transport, de même que le réarrangement manuel du matériau mis en place, sont des mesures qui peuvent aider à prévenir la ségrégation. Harlan (Annexe B) décrit en détail ces problèmes et suggère des méthodes de manutention et de mise en place pour réduire la ségrégation.



4.2.4. Contamination du filtre

La contamination des filtres durant la construction est un problème courant. En traversant les filtres et les drains, le matériel de construction peut contaminer ou déplacer les matériaux des filtres et des drains, causer de sérieux dommages et même amener un changement dans la largeur de ces zones. Des réparations coûteuses peuvent en résulter. C'est une pratique courante de ne permettre le passage

Segregation of broadly-graded base or filter materials is inevitable as pointed out by Ripley (Appendix B). The USDA SCS, USBR, Lowe, Ripley, and Marulanda suggest one or both of the following approaches to minimize segregation of filter material :

- 1) Use narrowly-graded uniform filters,
- 2) Limit the maximum particle size of the filter.

If the USDA SCS criteria for control of the D_{90} with respect to the D_{10} is used in selecting the gradation, Fig. 16, segregation of the filter should not normally be a problem.

A common cause of segregation is the manner in which material is handled. Material placed in a pile off a conveyor, or loaded from a chute or from a hopper permits the larger particles to roll to the sides of the stockpile or within the hauling unit. When material is dumped on the fill, segregation occurs. Use of rock ladders, spreader boxes, "elephant trunks" for loading hauling units, and hand working the placed material will help prevent segregation. Harlan (Appendix B) describes these problems in some detail and suggests handling and placement techniques to minimize segregation.

Fig. 17

Spreader box in use on the Raul Leoni (Guri) dam in Venezuela.
Épandeuse utilisée au barrage de Raul Leoni (Guri), au Venezuela.

4.2.4. Filter contamination

Contamination of filters during construction is a common problem. Crossing the filters and drains with construction equipment can contaminate or move the filter or drain material causing serious damage and disruption of the filter width. Costly repair can result. It is common practice to restrict the crossing of filter zones to specific locations, thus reducing the exposure of filters to damage. Where

sur les zones de filtre qu'à des endroits bien précis, réduisant ainsi la possibilité que les filtres soient endommagés. Aux endroits où les filtres et les drains sont traversés, ils devraient être protégés; des géotextiles, géomembranes et/ou un remblai de protection de 0,3 m d'épaisseur sont généralement utilisés. Les endroits de passage devraient être déplacés horizontalement d'une couche à l'autre, spécialement près des appuis, afin d'éviter d'avoir une zone verticale de matériaux susceptibles d'être contaminés et trop compactés.

La contamination survient aussi durant les périodes de pluie lorsque le ruissellement des boues apporte des particules fines dans les zones de filtre. Ceci peut être causé par l'érosion de la surface d'un remblai en construction ou l'érosion d'un appui. Si le filtre fin est bien conçu, sa surface ne sera couverte que par une mince couche de fines; en enlevant cette couche, le filtre intact non contaminé sera mis à découvert. Peu de dommages se sont produits. Si le filtre est trop grossier, les particules fines érodées pénétreront dans le filtre ou le drain et il y aura contamination. Des problèmes semblables peuvent être atténués en maintenant le niveau des filtres plus haut que le remblai adjacent.

La contamination du filtre grossier ou du drain par les particules fines provenant de l'érosion peut survenir, et même survient souvent. Dans ce cas, les particules fines pénétreront dans le filtre parce que le matériau est trop grossier. Pour éviter cette situation, certains concepteurs spécifient que les zones de filtre soient maintenues à un niveau plus élevé que le matériau à protéger (Pritchett, 1985; Kleiner, Annexe B). Un aménagement de la surface du remblai en pente à partir des filtres éloignera le ruissellement des filtres et le dirigera vers les talus extérieurs du barrage. Ces méthodes contribuent à empêcher que les boues entraînées par le ruissellement ne traversent les filtres durant la majeure partie de la construction.

La contamination peut aussi se faire par la poussière dégagée lors du déchargement de l'enrochement adjacent sans arrosage, ou encore à un endroit très poussiéreux comme au voisinage d'une route servant au transport où il y a peu de contrôle de poussière.

La méthode de protection avec géotextile ou géomembrane est souvent utilisée lorsqu'il y a une longue période d'inactivité, une longue période de pluie ou lorsque le filtre est pour d'autres raisons susceptible d'être contaminé.

4.2.5. Modification des propriétés en cours de construction

Les opérations de mise en place, d'épandage et de compactage peuvent influencer la qualité du filtre une fois construit. Des méthodes de mise en place et d'épandage inadéquates peuvent être la cause de concentrations de particules trop grossières pour protéger le matériau de base. Les matériaux de filtre qui ont une durabilité marginale peuvent être broyés lors du compactage, ce qui produit un filtre avec trop de fines, de perméabilité réduite, et peut maintenir des fissures ouvertes.

Des **essais de contrôle** de la granulométrie et de la qualité des filtres devraient être effectués **après le compactage**. La qualité des sources de matériaux devrait faire l'objet d'une approbation avant la construction.

crossings occur, the filter/drain system should be protected; geotextiles, geomembranes, and/or a protective fill, 0.3 m thick, are commonly used. Crossings should be moved horizontally from lift to lift, especially adjacent to abutments, to avoid a vertical zone of material that has a higher probability of contamination and excessive compaction.

Contamination also occurs during periods of rainfall when muddy runoff carries fines to the filter zones. This can occur from erosion of a partially constructed fill surface or from erosion of the abutment areas. If the fine filter is designed properly, only a thin skin of fines will cover the surface of the filter; after removal of the skin, the intact uncontaminated filter is exposed. Little damage has occurred. If the fine filter is too coarse, eroded fines will enter the filter and contamination will occur. Such problems can be minimized by keeping the elevation of the filters higher than the adjacent fill.

Contamination of the coarse filter or of drain material with eroded fines can and often does occur. In this case, fines will penetrate the filter because of the coarseness of the material. To avoid this problem, some designers specify that the filter zones be kept at a higher elevation than the adjacent finer base material (Pritchett, 1985; Kleiner, Appendix B). Sloping the embankment surface away from the filters will force runoff toward the outer slopes of the embankment and away from the filters. These techniques help prevent muddy runoff from crossing the filters during much of the construction period.

Contamination may also occur by dust when dumping adjacent rockfill without water sluicing or at an excessively dusty location such as adjacent to a haul road with little dust control.

Protection with a geotextile or geomembrane is a technique that is often used during prolonged periods of inactivity, during persistent rainy periods, or when the filter is otherwise vulnerable to contamination.

4.2.5. Change in properties during construction

The construction operations of placing, spreading, and compaction can influence the quality of the constructed filter. Improper placing and spreading can cause concentrations of oversize particles too coarse to protect the base material. Marginally durable filter materials may break down during compaction resulting in a filter with excessive fines, reduced permeability, and the ability to sustain a crack.

Quality control tests of the gradation and quality of the filters should be performed **after compaction**. Acceptable sources of materials with respect to quality should be approved prior to construction.

4.3. DIFFERENCES ENTRE LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION

4.3.1. Cahier des charges imprécis

Pritchett (1985) suggère que les spécifications devraient couvrir, en plus des prescriptions normales pour le compactage, l'épaisseur des couches, la granulométrie et la qualité des matériaux, les éléments suivants :

- 1) Les méthodes de mise en place et d'épandage, telles que le maintien des zones de filtre en avance sur le remblai adjacent,
- 2) Les spécifications d'ajustement de la teneur en eau et d'épandage pour réduire la ségrégation et le chevauchement entre les zones en utilisant par exemple des boîtes d'épandage,
- 3) Les spécifications pour un compactage particulier à l'interface entre les zones.

D'autres prescriptions pourraient être ajoutées concernant :

- 1) La localisation et les moyens à prendre pour protéger les endroits de passage sur les filtres et les drains,
- 2) La protection requise durant des arrêts prolongés de la construction.

L'USBR (Annexe B) mentionne « le problème de la description, dans le cahier des charges, des matériaux d'emprunt qu'il faut traiter pour en faire des filtres. La conception des installations de traitement pour la fabrication d'un filtre, répondant à des spécifications granulométriques sévères, doit s'accommoder des variations naturelles et de la distribution granulométrique des matériaux à l'intérieur de la zone d'emprunt, de même que des propriétés comme la dureté, la forme et la densité relative de chaque particule. L'US Bureau of Reclamation a eu des réclamations importantes fondées sur des descriptions trompeuses du matériau d'emprunt qui devait être traité pour la fabrication des matériaux des filtres et des drains ».

4.3.2. Surveillance/inspection inadéquate durant la construction

Pritchett (1985) attire l'attention sur la nécessité d'avoir des prescriptions adéquates et une bonne inspection, et de s'assurer que le processus de construction transforme le projet en réalisations satisfaisantes.

Ingles (Annexe B) déclare :

« Les coefficients de sécurité adoptés dans la conception semblent adéquats; ceux utilisés dans le contrôle de la qualité ne le sont sûrement pas. Pour les barrages en terre où les moindres accrocs à la qualité peuvent être fatals, j'ai recommandé depuis longtemps que le moyen le plus économique d'assurer la qualité est d'avoir un ingénieur sur le site, sur le chantier, durant toutes les heures de travail. »

Généralement, le maître d'ouvrage/concepteur prévoit une équipe de chantier pour s'occuper des tâches du contrôle de la qualité et de l'assurance qualité, de façon à veiller à ce que les spécifications soient suivies et la surveillance requise

4.3. DIFFERENCES BETWEEN DESIGN AND AS-BUILT

4.3.1. Unclear specifications

Pritchett (1985) suggests that the specifications should cover the following in addition to the usual requirements for compaction, lift thickness, gradation, and material quality :

- 1) Placement and spreading techniques, such as keeping the filter zones ahead of the adjacent fills,
- 2) Moisture conditioning and spreading requirements to minimize segregation and inter-zone intrusion such as the use of spreader boxes,
- 3) Requirements for deliberate compaction of zone boundaries.

Other requirements might include :

- 1) Locations and measures to protect crossings of filter and drain systems,
- 2) Required protection during prolonged shut down of operations.

The USBR (Appendix B) reports a problem in “ describing, in the construction documents, the borrow materials to be processed for filters. Design of processing plants to produce filter material meeting stringent gradation requirements must accommodate natural variability and distribution of particle size gradation within the borrow area and of properties such as hardness, shape, and specific gravity of individual particles. The US Bureau of Reclamation has had large claims based on alleged misleading descriptions of borrow material to be processed for filters and drains ”.

4.3.2. Inadequate construction surveillance/inspection

Pritchett (1985) emphasizes the necessity to properly specify, inspect, and assure that the actual construction process translates the design intent into satisfactory “ as-built ” conditions.

Ingles (Appendix B) states :

“ The safety factors in design seem to be quite adequate; those in quality control are certainly not. For earth dams, where the slightest lapse in quality can be fatal, I have long recommended that the cheapest form of quality assurance is a professional engineer on the site, on the job, every hour of the working day. ”

Commonly, the owner/designer organizes a field team to perform the tasks of quality control and quality assurance to enforce the specifications and to provide surveillance. The field staff must maintain close contact with the designers for

apportée. Le personnel du chantier doit maintenir un contact étroit avec les concepteurs pour prendre les décisions liées aux objectifs du projet. De plus, l'équipe de conception doit se rendre fréquemment au chantier pour apporter l'aide supplémentaire nécessaire et effectuer des inspections régulières. L'effort combiné de ces activités permet d'accroître les chances de succès dans la réalisation des travaux.

4.3.3. Déficiences

Un cahier des charges et une surveillance de chantier inadéquats peuvent laisser plusieurs décisions critiques à l'entrepreneur, ce qui pourrait compromettre la qualité désirée et l'efficacité des filtres. Les filtres qui sont construits d'après des spécifications inadéquates et sous une mauvaise surveillance pourraient bien ne pas avoir l'efficacité attendue, ce qui pourrait laisser un doute sur la sécurité à long terme d'un barrage en remblai comprenant de tels filtres.

decisions related to the design intent. In addition, the design team makes frequent trips to the site to provide additional input as needed and for routine inspection. The combined effort of these activities is to increase the success rate of translating the design intent to the actual constructed product.

4.3.3. Resultant unsatisfactory structure

Inadequate specifications and inadequate field surveillance can leave many critical decisions to the Contractor's discretion and the intended quality and function of the filters are easily compromised. Filters which are constructed under inadequate specifications and surveillance will not likely perform as intended and the long-term safety of the embankment dam containing such filters may be in doubt.

5. EXEMPLES

Plusieurs réponses au questionnaire comprenaient des résumés d'exemples. Ces résumés décrivent toute une gamme de comportement de filtres, depuis des incidents impliquant une défaillance du filtre et des réparations jusqu'aux cas où les filtres et les drains se sont bien comportés. Ripley et Ingles (Annexe B) présentent tous deux un certain nombre d'incidents de mauvais comportement de filtre. Le Tableau 5 est une liste sommaire de ceux qui ont répondu au questionnaire et présenté des cas réels; la liste comprend également le nom du barrage et une brève description des cas en question.

L'annexe B présente des commentaires additionnels sur les réponses au questionnaire, avec les noms et adresses des auteurs. Pour plus d'informations, le lecteur est invité à communiquer avec les différents comités nationaux, organismes, personnes et États des États-Unis mentionnés dans l'annexe B.

Tableau 5
Résumé des exemples

Auteurs	Nom du barrage	Description du cas
COMITÉS NATIONAUX :		
Australie	Barrage de Harding	Essais de laboratoire très élaborés sur la capacité des filtres à retenir des argiles dispersives contenant du silt.
	Barrage de Googong	Géotextile utilisé en crête pour augmenter la revanche.
	Barrage de Tuggeranong	Géotextile utilisé comme transition sous le riprap.
Colombie	Barrage de Sesquille	Détails, coupes types et granulométries des filtres de barrages en enrochement et de barrages à masque amont en béton de grande hauteur.
	Barrage de Chivor	
	Barrage de Guavio	
	Barrage de Golillas	
	Barrage de Salvajina	
Égypte	Haut barrage d'Assouan	Détails des filtres.
Finlande	Barrage de Kurkiaska	Conception type des filtres de barrages en Finlande.
Allemagne	Barrage de Bromback	Coupe transversale type du barrage.
Japon	Divers barrages	Granulométries des filtres.
Corée	Barrage de Soyang gang	Granulométries et caractéristiques des matériaux.
Afrique du Sud	Barrage de Kwaggaskloof	Matériau du drain-cheminée trop grossier, importantes réparations requises.
	Barrage de Balancing	Fissuration, érosion et formation de tunnels en crête et dans le talus aval du barrage.

5. CASE HISTORIES

Many of the responses included summaries of case histories. These summaries described a broad range of filter performance from incidents of filter failure with accompanying remedial treatment to situations in which filters and drains have performed well. Ripley and Ingles (Appendix B) both present a number of incidents of poor filter performance. Table 5 is a summary listing of those respondents that presented case histories, the dams involved, and a comment relating to the nature of the case history.

Appendix B presents additional comments concerning each response along with names and addresses of each respondent. Readers are encouraged to correspond with the various National Committees, the agencies, individuals, or states listed in Appendix B for further information.

Table 5
Summary of Case Histories

Respondent	Name of dam	Items included with response
NATIONAL COMMITTEES : Australia	Harding Dam	Extensive laboratory testing of retention capability of filter against dispersive clays with silts.
	Googong Dam	Geotextile used in crest structure to gain freeboard.
	Tuggeranong Dam	Geotextile used as bedding filter under riprap.
Colombia	Sesquille Dam Chivor Dam Guavio Dam Golillas Dam Salvajina Dam	Details, cross-sections, and filter gradations of high rockfill dams and concrete-faced rockfill dams.
Egypt	High Aswan Dam	Details of filters.
Finland	Kurkiaska Dam	Typical filter design for dams in Finland.
Germany	Bromback Dam	Cross-section of dam.
Japan	Various dams	Filter gradations.
Korea	Soyang gang Dam	Gradations and material parameters.
South Africa	Kwaggaskloof Dam	Overly coarse chimney drain, major repairs required.
	Balancing Dam	Cracking, erosion, and tunnelling on the crest and downstream slope of the dam.

Auteurs	Nom du barrage	Description du cas
ORGANISMES :		
Pakistan Ministry of Water and Power	Barrage de Khanpur	Érosion des fines à travers les joints d'un calcaire et le filtre entourant des puits de décompression.
	Barrage de Tarbela	Formation de trous d'affaissement dans le Barrage auxiliaire n° 1, explication de l'incident.
New South Wales, Public Works	Barrage de Ben Boyd	Système horizontal de filtre et drain inefficace, ayant conduit à des réparations importantes.
	Barrage de Deep Creek	Tapis drainant épais placé au fond de la vallée.
États-Unis, Bureau of Reclamation	Barrage de Kingsley	Filtre inadéquat sous la protection du talus.
	Barrage de New Waddell	Note technique sur les filtres, spécifications de construction, coupe transversale type et détails.
	Barrage de Crab Orchard	Des trous d'affaissement ont conduit au remplacement du filtre et du drain de pied.
États-Unis, Tennessee Valley Authority	Barrage de Columbia	Granulométrie type des filtres et drains, détails types et coupes transversales types.
PERSONNES :		
Creegan, Pat	Barrage de Red Mountain	Utilisation d'un drain-cheminée étroite.
	Barrage de Ramona	Filtre et drain-cheminée placés avec une boîte d'épandage.
Domer, Ronald	Barrage de Iron Canyon	Barrage homogène en terre avec un filtre-cheminée vertical et un tapis drainant.
Bravo Guilen, Guillermo	Barrage de Canales	Résultats des essais de filtres.
Ingles, Owen	Barrage de Ben Boyd	Géotextile sous le tapis filtre-drain pour éviter la migration de silt dans le tapis.
Kleiner, David	Barrage principal Aménagement de Rocky Mountain	Filtre et drain-cheminée étroits dans le barrage en terre et enrochement d'un réservoir de stockage par pompage.
Lafleur, Jean	Baie James	Détails d'essais de filtres avec des matériaux de base à granulométrie étalée.
Patrick, James G.	Barrage de McNary	Filtres enlevés et remplacés à l'aide de tunnels dans le remblai.
Ripley, Charles	Divers barrages	Granulométrie du filtre inadéquate pour le matériau de base.
Seemel, Richard	Chutes Churchill	Érosion interne dans plusieurs barrages, trous d'affaissement et réparations.
Sierra, Jesus Maria	Barrage de Salvajina	Détails de la granulométrie des filtres et de leur utilisation.

Respondent	Name of dam	Items included with response
AGENCIES :		
Pakistan, Ministry of Water and Power	Khanpur Dam	Fines movement through limestone joints and through filter surrounding relief wells.
	Tarbela Dam	Formation of sinkhole in Auxiliary Dam No. 1, explanation of incident.
New South Wales, Public Works	Ben Boyd Dam	Ineffective blanket filter/drain system caused substantial repairs.
	Deep Creek Dam	Thick drainage layer used in valley floor.
USA, Bureau of Reclamation	Kingsley Dam	Improper filter below slope protection.
	New Waddell Dam	Filter memorandum, construction specification, cross-section and details.
	Crab Orchard Dam	Occurrence of sink-holes caused replacement of filter and toe drain.
USA, Tennessee Valley Authority	Columbia Dam	Typical gradation for filters and drains, typical details, and cross-sections
INDIVIDUALS		
Creegan, Pat	Red Mountain Dam	Use of narrow chimney filter.
	Ramona Dam	Chimney filter and drain placed with spreader box.
Domer, Ronald	Iron Canyon Dam	Homogeneous earthfill dam with a vertical chimney filter and blanket drain.
Bravo Guilen, Guillermo	Canales Dam	Details of filter tests.
Ingles, Owen	Ben Boyd Dam	Geotextile below filter/drain blanket to prevent migration of silts into the system.
Kleiner, David	Main Dam, Rocky Mountain Project	Use of narrow chimney filters and drains in an earth and rockfill dam for a pumped storage reservoir.
Lafleur, Jean	James Bay	Filter testing details with broadly-graded base material.
Patrick, James G.	McNary Dam	Removed and replaced filters by tunneling into the embankment.
Ripley, Charles	Various dams	Unsuitable filter gradation for adjacent base material.
Seemel, Richard	Churchill Falls	Internal erosion in several dams resulting in sinkholes, remedial treatment.
Sierra, Jesus Maria	Salvajina Dam	Details of filter gradations with specific uses.

Auteurs	Nom du barrage	Description du cas
<p>ÉTATS DES ÉTATS-UNIS :</p> <p>Californie</p> <p>Pennsylvanie</p>	<p>Barrage de Eureka Lake</p> <p>Barrage sur un affluent de la Leavitt, ruisseau Broadhead</p>	<p>Insuffisance de la capacité drainante du système de filtre/drain.</p> <p>Quasi-rupture, matériau de remblai à granulométrie étalée.</p>

Respondent	Name of dam	Items included with response
<p>STATES OF THE UNITED STATES :</p> <p>California</p> <p>Pennsylvania</p>	<p>Eureka Lake Dam</p> <p>Dam on Leavitt Branch, Broadhead Creek</p>	<p>Insufficient discharge capacity of filter/drain system.</p> <p>Near failure, broadly-graded fill material.</p>

6. POINTS DE VUE CONTROVERSÉS

6.1. ÉVALUATION DES MATÉRIAUX DE NOYAU A GRANULOMÉTRIE ÉTALÉE

Comme mentionné précédemment, il n'y a pas encore de consensus sur la façon la plus appropriée d'évaluer les matériaux de noyau à granulométrie étalée et de concevoir le filtre fin adjacent. L'USBR et l'USDA SCS ont adopté les recommandations de Sherard (Sherard et Dunnigan, 1989) qui requièrent un ajustement de la granulométrie du sol de base en enlevant le matériau retenu sur le tamis n° 4. L'USBR conseillait d'effectuer cet ajustement dans le Rapport de laboratoire n° EM-425, 1955, et avait inclus cette recommandation dans *Design of Small Dams* (1960, 1973, 1987). Lafleur (1987) suggère d'effectuer une analyse de la granulométrie du sol de base. D'autres adoptent d'autres techniques.

Le concepteur prudent peut souhaiter vérifier le choix de la granulométrie du filtre en se servant de plusieurs méthodes et/ou en effectuant des essais de laboratoire pour confirmer son choix.

6.2. ACCEPTATION DE LA POSITION DE SHERARD SUR LE ROLE CRITIQUE DU FILTRE DANS LA PROTECTION DU NOYAU

Sherard et Dunnigan (1989) décrivent la recherche en laboratoire orientée vers l'étude des « filtres critiques » situés à l'aval, qui ont été ou pourraient être exposés à des écoulements concentrés dans la zone imperméable. Ils affirment :

« Une grande variété de silts fins et d'argiles, et de sables silteux et argileux d'origines géologiques différentes ont été testés (« essais de filtre sans érosion » décrits précédemment dans ce bulletin). Les résultats des essais confirment de façon probante que des filtres de sable contenant des quantités suffisantes de sable fin vont contrôler et couper des écoulements concentrés à travers la zone imperméable d'un barrage en remblai. Les recherches indiquent qu'un filtre aval en sable, ayant un D_{15} égal ou inférieur à 0,5 mm, est une mesure prudente pour la plupart des silts fins et des argiles. De plus, un filtre relativement fin est nécessaire pour les sols à granulométrie étalée comme les moraines d'origine glaciaire. »

D'après les réponses au questionnaire, cette philosophie a été largement acceptée à certaines conditions. L'USBR (Annexe B) indique :

« Cette philosophie a été largement acceptée et est généralement appliquée par l'USBR... L'USBR attribue encore une grande importance au contrôle de la mise en place et du compactage des matériaux du noyau. Toutefois, le fait de se fier davantage au filtre aval a conduit à l'utilisation de noyaux plus étroits pour plusieurs projets importants de l'USBR. Le traitement des fondations a été et demeure

6. CONTROVERSIAL ISSUES

6.1. EVALUATION OF BROADLY-GRADED CORE MATERIALS

As described earlier, there is no agreement on the most appropriate procedure to evaluate a broadly-based core material and to design the adjacent fine filter. The USBR and the USDA SCS have adopted the recommendations of Sherard (Sherard and Dunnigan, 1989) which require an adjustment of the base soil gradation by removing the plus No. 4 sieve size material. The USBR advocated this adjustment in Laboratory Report No. EM-425, 1955, and included the recommendation in *Design of Small Dams* (1960, 1973, 1987). Lafleur (1987) suggests a detailed analysis of the base soil gradation. Other respondents use other techniques.

The prudent designer may wish to check the selection of the filter gradation using more than one procedure and/or to perform laboratory tests to substantiate the selection.

6.2. ACCEPTANCE OF SHERARD'S RELIANCE ON THE CRITICAL FILTER TO PROTECT THE CORE

Sherard and Dunnigan (1989) describe laboratory research directed at studying "critical" downstream filters that have been or might be exposed to concentrated leaks developing in the protected impervious embankment material. They state :

" A wide range of different fine silts and clays and clayey and silty sands of different geologic origins were tested [using the " no erosion filter test " described earlier in this bulletin]. The results of the investigation confirm conclusively that sand filters containing appropriate quantities of fine sand will reliably control and seal concentrated leaks through the impervious sections of embankment dams. The investigations show that for most fine silts and clays, a downstream sand filter with $D_{15} < \text{or equal to } 0.5 \text{ mm}$ is conservative and that broadly-graded soils, such as those from glacial moraines, need a relatively fine filter. "

Judging from the responses to the questionnaire, this philosophy has been widely accepted with some conditions. The USBR (Appendix B) states :

" This philosophy has been widely accepted and is currently practiced by Reclamation... Reclamation still places significant importance on the placement and compaction control of core materials. However, the increased dependence placed on downstream filters has been manifested in the use of thinner cores on several major Reclamation projects. Foundation treatment has been, and will continue to

un sujet majeur de préoccupation pour l'USBR. En se fiant davantage aux filtres, il a été possible d'envisager des barrages en terre avec noyau mince, dans des gorges relativement étroites, ce qui n'aurait pu être considéré auparavant. »

Peck (1990) est peut-être celui qui présente la meilleure synthèse :

« Je suis d'accord avec Sherard pour reconnaître que l'information actuelle concernant le comportement des barrages suggère que le filtre adjacent au noyau joue un rôle encore plus vital qu'on ne le croyait jusqu'à présent. **Sans aucun doute, comme cela a été reconnu depuis longtemps, le filtre aval limite la quantité de matériau que peut perdre le noyau par érosion et, par conséquent, protège l'intégrité du noyau. De plus, il joue le rôle de noyau quand, pour quelque raison que ce soit, des imperfections dans le noyau permettent l'apparition d'écoulements concentrés.** Par conséquent, l'écoulement à travers tout le barrage peut ne pas augmenter de façon perceptible, même quand des imperfections se développent dans le noyau. Le filtre colmaté par les fines remplace le noyau dans ses fonctions.

Par contre, je n'irais pas aussi loin que Sherard en concluant que l'effet bénéfique du filtre peut justifier de réduire les efforts pour assurer l'intégrité du noyau. Le principe de défense en profondeur d'Arthur Casagrande, adopté de si bon cœur par Harry Seed, devrait demeurer un principe de base à suivre par tous les concepteurs de barrages. **La leçon qu'il faut retenir n'est pas que les noyaux peuvent être maintenant considérés comme moins vitaux pour la sécurité, mais qu'il faut considérer avec plus de soin et d'attention la protection qu'apporte le filtre.** De toute façon, la reconnaissance de l'importance de la mince couche qui est colmatée par les fines, dans la partie amont de la zone de filtre, devrait conduire à une meilleure compréhension et une meilleure conception des ouvrages de retenue. »

6.3. VALEUR POTENTIELLE D'UN FILTRE DE SABLE AU SOMMET D'UN BARRAGE, SUR LA FACE AMONT D'UN NOYAU IMPERMÉABLE, POUR REMPLIR LES FISSURES

Sherard et Dunnigan (1985) n'ont pas favorisé l'utilisation du filtre amont pour remplir les fissures d'un noyau pour les raisons suivantes :

1) Le filtre aval est considéré comme la principale ligne de défense. Pour répondre à toute préoccupation, à savoir s'il est suffisant et adéquat, il faut le rendre plus efficace plutôt que de créer une autre ligne de défense douteuse à l'amont.

2) Il est difficile d'avoir l'assurance que le sable à l'amont remplira les fissures. La vitesse des infiltrations dans une fissure sera faible, à cause de la présence du filtre en aval, et peut ne pas être suffisante pour transporter le sable. Toutefois, E. Maranhã das Neves (Annexe B) démontre qu'un sable moyen uniforme de $D_{100} = 0,5$ mm se déplacera dans des fissures de 2,5 mm lorsque l'eau a une vitesse de 1,5 cm/s. L'expérience néo-zélandaise (Annexe B) justifie également l'utilisation de filtres en sable à l'amont pour remplir les fissures.

be, a major area of concern for Reclamation. The increased dependence placed on filters has also allowed the consideration of thin earth core dams in relatively narrow canyons that would not have been considered previously. ”

Perhaps Peck (1990) presents the best summation :

“ The writer agrees with Sherard that the available data on performance of dams suggest that the filter adjacent to the core serves a purpose even more vital than has generally been assumed. **Undoubtedly, as has long been recognized, the downstream filter limits the amount of material that can be lost from the core by erosion and thereby protects the integrity of the core. In addition, however, it serves as a substitute core where, for any reason, defects in the core have permitted concentrated seepage.** Hence, seepage through the dam as a whole may not increase perceptibly even when defects develop in the core. The impregnated filter takes over the function of the core.

The writer would not go so far as Sherard in concluding that this beneficial action of the filter would justify reducing efforts to ensure the integrity of the core. Arthur Casagrande’s principle of defense in depth, so wholeheartedly adopted by Harry Seed, should remain a guiding principle for all designers of dams. **The lesson to be learned is not that cores may now be considered less vital with respect to safety, but that filter protection deserves greater care and attention.** In any event, consideration of the importance of the filter skin, the impregnated upstream portion of the filter zone, should lead to improved understanding and design of water-retaining structures. ”

6.3. POTENTIAL VALUE OF SAND FILTER AT TOP OF DAM ON UPSTREAM FACE OF IMPERVIOUS CORE TO ACT AS A CRACK FILLER

Sherard and Dunnigan (1985) discouraged the use of the upstream filter to act as a crack filler for the following reasons :

1) The downstream filter is considered the main line of defense. Any concerns with the adequacy of the downstream filter should be addressed by making it more conservative rather than creating another line of defense of questionable value upstream.

2) It is difficult to be confident that the upstream sand would fill cracks. The velocity of flow through a crack would be low because of the presence of the downstream filter, and may not be sufficient to transport the sand. E. Maranha das Neves, however (Appendix B) demonstrates that uniform medium sand with a $D_{100} = 0.5$ mm will flow into 2.5 mm cracks under a water velocity of 1.5 cm/s. Experience in New Zealand (Appendix B) also substantiates the use of upstream sand filters to act as crack fillers.

3) La pénétration du sable dans une fissure peut avoir tendance à maintenir ouverte la fissure et, par conséquent, à empêcher l'étanchement qui pourrait arriver autrement. En effet, la fermeture complète de la fissure peut survenir par ramollissement ou gonflement des parois.

4) Une autre zone de matériau est ajoutée en crête, ce qui ajoute des coûts et complique la construction.

Les grands concepteurs ne sont pas disposés à éliminer la défense additionnelle que représente le filtre amont de sable, surtout que des cas spécifiques ont été rapportés où le sable a pénétré dans les fissures (E. Maranha das Neves et Nouvelle-Zélande, Annexe B). Voici d'autres raisons qui justifient les filtres en amont :

1) Lorsque des transitions entre le gros enrochement de la recharge et le noyau à granulométrie fine sont nécessaires et qu'une zone à plusieurs matériaux est requise, chaque matériau conservant sa compatibilité avec les zones adjacentes,

2) Pour une protection contre le marnage normal d'un réservoir de stockage par pompage, où la vitesse de descente du niveau du réservoir en exploitation peut atteindre 3 m à l'heure.

Post mentionne (note personnelle, 1993) :

« Même si Sherard n'encourage pas l'utilisation d'un filtre de sable fin à l'amont pour remplir les fissures, il ne s'y oppose pas (Water Power, décembre 1984); et si le filtre fin n'est pas transporté par l'eau dans les fissures, il va contribuer à réduire la percolation étant donné sa perméabilité relativement faible, comparée à celle d'un matériau de transition grossier ou de la recharge en enrochement. Je le recommande donc aux endroits où la fissuration du noyau est probable et dans les régions où la sismicité est importante. »

6.4. UTILISATION DE GÉOTEXTILES A LA PLACE DE FILTRES GRANULAIRES

Giroud (1990) suggère plusieurs utilisations pour les géotextiles dans les barrages en remblai, incluant :

- 1) Système filtre/drain vertical pour remplacer le drain-cheminée,
- 2) Système filtre/drain horizontal pour remplacer le tapis drainant horizontal,
- 3) Système filtre/drain de fondation,
- 4) Système filtre/drain horizontal à l'intérieur des recharges amont ou aval,
- 5) Filtre de transition entre des zones de matériaux incompatibles, ou entre le noyau et la fondation,
- 6) Filtre de transition entre le riprap et le remblai en terre, ou entre une couche de filtre grossier et le remblai en terre,
- 7) Filtre de transition entourant un matériau granulaire grossier de drain.

3) The penetration of sand into the crack may tend to prop the crack open and thereby tend to prevent sealing that might otherwise occur by squeezing shut by softening or swelling of the crack walls.

4) Another zone of material is added at the crest, causing added cost and complicating the construction.

Main designers are reluctant to exclude the additional defense of the upstream sand filter, especially when specific cases of sand movement into cracks can be cited (E. Maranha das Neves and New Zealand, Appendix B). Other reasons for upstream filters include :

1) Transitions between coarse rockfill shells and the fine-grained core where a multi-stage zone is required, each material maintaining filter compatibility with adjacent zones,

2) Upstream filter protection against the operating drawdown of a pumped storage reservoir, where operating rates of drawdown can exceed 3 m per hour.

Post states (private communication, 1993) :

“ Although Sherard discouraged the use of an upstream fine filter as a crack filler, he did not oppose it (Water Power, December 1984); and if the fine filter is not washed into the crack, it will contribute to the reduction of seepage because of its relatively low permeability as compared to coarse transition or rockfill shell. Therefore, I personally recommend it in special locations where cracking of the core is probable and in seismic areas. ”

6.4. USE OF GEOTEXTILES AS A SUBSTITUTE FOR GRANULAR FILTERS

Giroud, 1990, suggests a variety of uses for geotextiles in embankment dams including :

1) Vertical filter/drain systems to serve as a replacement for the chimney drain,

2) Horizontal filter/drain systems to serve as a replacement for the horizontal drainage blanket,

3) Foundation filter/drain systems,

4) Horizontal filter/drain systems within the upstream or downstream shells,

5) Transition filter between zones of incompatible material or between core and foundation,

6) Transition filter between riprap and earthfill or between a coarse bedding filter and earthfill,

7) Transition filter surrounding coarse granular drain material.

L'utilisation de géosynthétiques devient plus fréquente dans la construction de nouveaux barrages et dans les réparations de barrages existants. Plusieurs de ceux qui ont répondu au questionnaire ont donné des exemples d'utilisation de géotextiles dans les barrages en remblai :

1) Comme partie d'un détail de crête où il y a une très faible charge d'eau. Le filtre en géotextile peut être adopté lors de la conception initiale, ou faire partie d'une réparation ou d'une surélévation de la crête pour gagner un peu de revanche lors de crues maximales.

2) Pour isoler un système filtre/drain horizontal des sols fins de la fondation. Ingles (Annexe B) décrit une telle utilisation sur le barrage Ben Boyd en Australie.

3) Pour isoler le remblai en terre, ou le matériau fin de la fondation, d'une couche de matériaux granulaires grossiers sur le parement amont des barrages en remblai ou des canaux de décharge.

4) Pour isoler le remblai en terre du matériau de protection sur le talus des barrages en remblai.

Il n'est pas considéré approprié d'utiliser un système filtre/drain géosynthétique pour remplacer les filtres amont et aval adjacents au noyau d'un barrage en remblai, ou pour remplacer les filtres dans un drain-cheminée ou un tapis drainant.

L'état du Wyoming « ne permet pas d'utiliser les géotextiles pour les drains/cheminées ou les drains de pied à l'intérieur d'un barrage en remblai; des filtres granulaires doivent être utilisés lorsque les analyses de stabilité signalent qu'ils sont nécessaires. »

Roth et Schneider, 1991, présentent les grandes lignes et conclusions suivantes :

« Les géosynthétiques disponibles offrent à la communauté des ingénieurs de barrages des possibilités et des défis : l'opportunité de concevoir des barrages économiques et sûrs; et le défi d'éviter de commettre une erreur pouvant conduire à une rupture de barrage. Éviter l'utilisation des géosynthétiques comme tapis n'est peut-être pas approprié, puisqu'ils peuvent permettre une conception sûre et plus économique dans certains cas. D'un autre côté, la possibilité de dommages catastrophiques et de pertes de vies dans le cas d'une rupture de barrage suggère une approche circonspecte et une utilisation prudente des géosynthétiques dans les barrages.

Les auteurs suggèrent les recommandations suivantes pour l'utilisation de géosynthétiques dans les barrages, avec l'espoir de provoquer des discussions ouvertes et constructives au sein de la communauté des concepteurs de barrages sur l'utilisation appropriée des géosynthétiques dans la conception moderne :

1) Les géosynthétiques ne devraient pas être utilisés dans les cas où ils servent de seule ligne de défense contre une rupture de barrage. Si une géomembrane est utilisée, par exemple, comme écran imperméable unique dans un remblai, il faudra vérifier la conception du reste du remblai pour s'assurer de la sécurité, même si des parties de la géomembrane sont rapidement et complètement enlevées.

The use of geosynthetics is becoming more commonplace in new dam construction and in the remedial treatment of existing embankment dams. Several respondents have provided examples of the use of geotextiles in embankment dams :

1) As part of a crest detail, where little head is involved. The geotextile filter might be included in the original design, or as part of a repair or crest raising to gain extra freeboard during maximum floods.

2) To isolate a granular blanket filter/drain systems from fine-grained foundation soils. Ingles (Appendix B) describes the use of a geotextile for this purpose at the Ben Boyd Dam in Australia.

3) To isolate earthfill or fine-grained foundation material from coarse granular bedding material on the upstream faces of embankment dams or in discharge channels.

4) To isolate earthfill from granular slope protection material on the downstream slope of embankment dams.

It is not considered appropriate to use a geosynthetic filter/drain system as a substitute for the upstream or downstream filters adjacent to the core of an embankment dam or as a substitute for the filters in a chimney or blanket drain.

The state of Wyoming will “ not allow the use of a filter fabric for chimney or toe drains within the embankment; granular filters must be used when stability analyses indicate they are needed ”.

Roth and Schneider, 1991, presents the following guidelines and conclusions :

“ The availability of geosynthetics presents the dam engineering community with both opportunities and challenges : opportunities to design economical, safe dams; and challenges to avoid inadvertently committing an unfortunate error leading to a dam failure. Blanket avoidance of geosynthetics is inappropriate, since they may permit safe, more economical designs in some cases. On the other hand, the potential for catastrophic damage and loss of life in the event of a major dam failure suggests a cautious approach and prudent use of geosynthetics in dams.

The authors offer the following suggested broad guidelines for the use of geosynthetics in dams, in the hopes of generating open and productive discussion by the dam engineering community on the appropriate uses of geosynthetics in modern dam design :

1) Geosynthetics should not be used in a configuration where they serve as the sole defense against dam failure. For example, if a geomembrane is used as the sole water barrier within an embankment, the remainder of the embankment design should be checked to assure that the embankment would be completely safe if portions of the geomembrane were suddenly and completely removed.

2) Les géosynthétiques devraient être utilisés d'abord aux endroits où ils peuvent être rapidement mis à nu, réparés et remplacés. Une géomembrane installée sur la face amont d'un barrage en béton, par exemple, peut être examinée, réparée ou remplacée si nécessaire.

3) Nous devrions élargir notre utilisation des géosynthétiques quand ils s'avèrent économiquement attrayants dans des applications non critiques, redondantes ou en surface. De cette façon, il sera possible d'augmenter nos connaissances sur le comportement des géosynthétiques dans les barrages et d'acquérir une expérience additionnelle et valable sur le comportement à long terme des géosynthétiques en service.

Conclusions

Les géosynthétiques sont des matériaux relativement nouveaux dont le comportement est moins connu que celui des matériaux traditionnels de barrages. Alors que ces nouveaux matériaux s'avèrent intéressants pour une conception économique et sûre, le besoin de sécurité dans la conception des grands barrages reste de la plus haute importance. Les géosynthétiques devraient être utilisés avec précaution dans les barrages. **De façon générale, ils devraient être utilisés seulement aux endroits où leur présence n'est pas critique pour le comportement à long terme du barrage et généralement aux endroits où ils peuvent être réparés et remplacés si nécessaire.** De cette façon, la communauté des ingénieurs de barrages peut développer l'expérience de ces produits avec un minimum de risque. Au fur et à mesure de l'augmentation de cette expérience, les recommandations suggérées dans ce chapitre pourront être revues. Les auteurs encouragent la poursuite des recherches et de la discussion sur cet important sujet.

2) Geosynthetics should primarily be used where they can be readily exposed, repaired, or replaced. For example, a geomembrane used on the face of a concrete dam can be examined, and repaired, or replaced, if required.

3) We should expand our use of geosynthetics when they prove to be economically attractive in non-critical, redundant, or superficial applications. In this way we can expand our knowledge on the behavior of geosynthetics in dams, and gain additional, valuable experience on the long-term performance of geosynthetics in service conditions.

Conclusions

Geosynthetics are relatively new materials with a limited performance history compared with traditional dam construction materials. While they offer the potential for economic and safe design, the need for safety in large dam design is paramount. Geosynthetics should be used with caution in dams. **In general, geosynthetics should only be used where they are not critical to the long-term performance of the dam, and generally where they can be repaired or replaced if necessary.** In this way, the dam engineering community can develop experience with these products with minimal risk. As experience with geosynthetics accumulates, the suggested policies in this paper will require reevaluation. The authors encourage further research and discussion of this important topic.”

7. REFERENCES

- BAKKER, K. J., 1987, "Hydraulic Filter Criteria for Banks", European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin.
- BAKKER, K. J., BRETELER, M. K., & DEN ADEL, H., 1990, "New Criteria for Filters and Geotextile Filters under Revetments", International Conference on Coast Engineering, Delft.
- BARBER, E. S., and SAWYER, C. L., 1952, "Highway Subdrainage", Proceedings, Highway Research Board, pp. 643-666.
- BAYLIS, J. R., 1959, "Review of Filter Bed Design and Methods of Washing", *Journal AWWA*, 1433-1454, November.
- BLIGH, W. G., 1910, "Dams, Barrages, and Weirs on Porous Foundations", *Eng. News*, 64, pp. 708-710.
- BRAUNS, J., and WITT, K. J., 1987, "Proposal for an Advanced Concept of Filter Design", *Proceedings*, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin.
- BRAUNS, J., 1990, "Filters and Drains", Contribution to NATO Advanced Study Institute, "Advances in Rockfill Structures", Lisbon.
- CEDERGREN, H. R., 1989, "Seepage, Drainage, and Flow Nets", Wiley & Sons, New York, NY.
- CASAGRANDE, A., 1937, "Seepage Through Dams", *New England Water Works Association*, Vol. LI, No. 2, June.
- FENN, D. D., 1966, "The Effects of Montmorillonite and Kaolinite Dispersions on the Permeability of a Porous Media », MS Thesis, Mississippi State University, State College, Mississippi.
- Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, 1974, translation from Russian, No. 7, pp. 24-27, July.
- GIROUD, J. P., 1990, "Functions and Applications of Geosynthetics in Dams", *Water Power & Dam Construction*, June, pp. 16-23.
- GROWDON, J. P., 1958, "Rockfill Dams: Nantahala Sloping Core Dam", *Journal of the Power Division*, ASCE, 1742, PO 4, August.
- HUMPHRIES, R. W., and CONNORS, R. C., 1989, "Design and Performance of the Cat Arm Dams and Tunnels", *Water Power & Dam Construction*, August.
- HADJ-HAMOU, T., TAVASSOLI, M. R., and SHERMAN, W. C., 1990, "Laboratory Testing of Filters and Slot Sizes for Relief Wells", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 9, p. 1325, September.
- ICOLD, Committee on Materials for Fill Dams, 1993, "Embankment Dams - Upstream Slope Protection, Review and Recommendations".
- JANSEN, R. B. (editor), 1988, "Advanced Dam Engineering For Design, Construction, and Rehabilitation", Van Nostrand Reinhold, New York.

- KENNEY, T. C., CHAHAL, E., CHIU, G. I., et al., 1985, "Controlling Constriction Sizes of Granular Filters", *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 32-43.
- KENNEY, T. C., and LAU, D., 1985, "Internal Stability of Granular Filters", *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 215-225.
- LANE, E. W., 1935, "Security from Under-seepage - Masonry Dams on Earth Foundations", *Transactions*, ASCE, 100, pp. 1235-1351.
- LAFLEUR, J., 1991, Prepared Contribution to Question 67, "New Developments for Fill Dams and Fill Cofferdams", *XVIIth Congress of the International Commission on Large Dams*, Vienna, Austria.
- LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., and ROLLIN, A. L., 1989, "Filtration of Broadly-graded Cohesionless Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, December.
- LAFLEUR, J., 1984, "Filter Testing of Broadly-graded Cohesionless Tills", *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 634-643.
- PECK, R. B., 1990, "Interface Between Core and Downstream Filter", *H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings*, BiTech Publishers, Vancouver, May.
- PRITCHETT, E. C., 1985, "Embankment Seepage Control, Design and Construction", *Proceedings*, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, Denver, May.
- ROTH, L. H., & SCHNEIDER, J. R., 1991, "Considerations for Use of Geosynthetics in Dams", *Geosynthetics in Dams*, USCOLD, April.
- SECO E PINTO, P. S., and SANTANA, T., 1989, "Filters for Clay Cores of Embankment Dams", *Proceedings*, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, August.
- SHERARD, J. L., 1973, "Embankment Dam Cracking", *chapter in Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume*, John Wiley & Sons, New York.
- SHERARD, J. L., 1979, "Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly-graded Soils", *ICOLD*, 13th Congress on Large Dams, Q. 49, R. 2, New Delhi.
- SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., and TALBOT, J. R., 1984 a, "Basic Properties of Sand and Gravel Filters", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, June.
- SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., and TALBOT, J. R., 1984 b, "Filters for Silts and Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, June.
- SHERARD, J. L., 1985, "Hydraulic Fracturing in Embankment Dams", *Proceedings*, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, May.
- SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., 1985, "Filters and Leakage Control in Embankment Dams, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, May.
- SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., 1989, "Critical Filters for Impervious Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, July.
- SILVEIRA, A., 1965, "An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters", *Proceedings*, 6th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- US Department of the Army, Corps of Engineers, 1948, "Laboratory Investigation of Filters, Enid and Grenada Dams", *Technical Manual 3-245*, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

- US Department of the Army, Corps of Engineers, 1982, "Earth and Rock Fill Dams - General Design and Construction Considerations", EM-1110-2-2300, May.
- US Department of the Army, Corps of Engineers, 1986, "Engineering and Design - Seepage Analysis and Control for Dams", EM-1110-2-1901, September.
- US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1986, "Soil Mechanics Note No. 1", *Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters*, January.
- US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987 a, "Design Standards No. 13 - Embankment Dams", Chapter 5 - Protective Filters, May.
- US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987 b, "Design of Small Dams", 3rd Edition, Water Resources Technical Publication, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Various authors, 1958, Series of papers on rockfill dams, American Society of Civil Engineers, Journal of the Power Division, Vol. 84, No. PO3 and PO4, June and August.
- VAUGHAN, P. R., and SOARES, H. F., 1982, "Design of Filters for Clay Cores of Dams", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, January.
- WILSON, S. D., and MARSAL, R. J., 1979, "Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams", ASCE.
- WITTMAN, L., 1979, "The Process of Soil Filtration - Its Physics and the Approach in Engineering Practice", VII European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- WOLSKI, W., 1987, "General Report to Session 9 on Filters", *Proceedings*, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3, pp. 1351-1366.

ANNEXES/APPENDICES

Annexe A. Terminologie

Annexe B. Questionnaire et réponses

Annexe C. Extrait d'un document russe intitulé « Principes de base de la technique des filtres inversés à l'interface avec des matériaux cohérents et non cohérents »

Appendix A. Terms and definitions

Appendix B. Questionnaire and responses

Appendix C. Excerpt of a Russian document entitled " Basic principles of engineering inverted filters at the interface with cohesive and non-cohesive soils "

TERMINOLOGIE

La terminologie suivante (Creegan, Dascal, Elges (Afrique du Sud), Lafleur, Annexe B) est dans la réponse au questionnaire. Elle est utilisée le plus souvent possible tout au long du Bulletin :

1) **Filtre.** Un milieu perméable et poreux, ou bien un matériau à travers lequel l'eau peut s'écouler (percolation), mais qui ne permet pas le passage ou le mouvement de particules solides en suspension. Ainsi, toute particule solide arrachée et transportée par écoulement est retenue à l'extérieur ou à l'intérieur du filtre. Cette action du filtre empêche l'érosion interne dans les matériaux adjacents, et l'écoulement se poursuit sans développer de pression interstitielle ou de sous-pression excessive. La lettre « D » désigne la dimension de particule dans le filtre; par exemple, D_{15} est la dimension pour laquelle 15 % en poids de l'ensemble des particules sont inférieurs.

Un **filtre granulaire** incorporé dans un barrage ou dans sa fondation est constitué de granulats minéraux de granulométrie naturelle ou résultant d'un traitement.

Il existe différents mécanismes de filtration selon que les matériaux de base sont cohérents ou pulvérulents (Lafleur et Mlynarek, 1990; Wolski, 1987) :

a) **Matériaux de base cohérents.** Des fissures peuvent se développer et persister; des particules isolées peuvent alors migrer vers le filtre. Un filtre adéquat peut ne pas retenir toutes les particules à l'interface, certaines particules plus fines peuvent pénétrer au-delà de l'interface de sorte que l'effet voûte peut se développer dans la matrice des particules plus grossières du sol protégé (Harlan, Annexe B). Les flocons ou les particules agrégées entrent en contact avec le filtre et y sont retenues. Le sujet des argiles dispersives a été traité séparément dans le Bulletin 77 de la CIGB, *Sols dispersifs dans les barrages en remblai – Aperçu général*, 1990.

b) **Matériaux de base pulvérulents.** Les fissures ne peuvent se développer et persister; seules des particules individuelles sont susceptibles d'être transportées au travers du filtre. Cependant, ce ne sont pas toutes les particules qui sont retenues dans un filtre adéquat, certaines particules plus petites migrent à partir de la zone proche de l'interface et l'effet voûte pourra se développer.

2) **Drain.** Des matériaux granulaires, des tuyaux ou d'autres dispositifs, utilisés seuls ou combinés, pour collecter, canaliser et évacuer l'eau et/ou pour diminuer les pressions interstitielles ou les sous-pressions dans le corps du barrage ou sa fondation. Le taux de décharge doit être suffisamment grand pour prévenir le développement de surpression dans le drain ou dans le milieu adjacent. Dans des situations spécifiques, le filtre fin (habituellement du sable un peu graveleux) ou grossier (principalement du gravier) peut être utilisé comme un drain.

3) **Matériau de base.** Une zone où les matériaux doivent être protégés par un filtre. Ce sont les zones du noyau, les filtres fins et grossiers et les drains selon la géométrie et le zonage du barrage. Donc, le matériau de base est toujours le

TERM AND DEFINITION

The following terms and definitions (Creegan, Dascal, Elges (South Africa), Lafleur, Appendix B) are in response to the questionnaire. As much as possible, these terms and definitions are used throughout the bulletin :

1) **Filter.** A pervious, porous zone or material through which water can flow (seepage) but which prevents the passage or movement of solid particles in suspension. Thus, the solid particles detached and transported by seepage are retained at or in the filter. By this action, the filter prevents piping in the adjacent material, at the same time carrying away seepage without excessive pore or uplift pressure buildup. The symbol "D" is used throughout to designate the filter particle size, ie, D_{15} is the particle size for which 15 % by weight of particles are smaller.

A **granular filter** consists of graded (naturally or by processing) mineral aggregate incorporated in the dam or its foundation.

Different filtration mechanisms are involved with cohesive and cohesionless bases (Lafleur and Mlynarek, 1990; Wolski, 1987) :

a) **Cohesive bases.** Open fissures can form and be sustained; individual particles can be washed towards the filter. An adequate filter need not retain all particles at the interface, some finer particles may migrate from the interface so that bridging of the coarser base particles can develop (Harlan, Appendix B). Flocs or aggregations of particles come in contact with the filter and are retained by the filter. Dispersive clays are discussed separately in ICOLD Bulletin 77, *Dispersive Soils in Embankment Dams - Review*, 1990.

b) **Cohesionless bases.** Open fissures cannot form or be sustained; only individual particles are susceptible to washing through the filter. With an adequate filter however, not all particles are retained, some finer particles migrate from near the interface so that bridging can develop.

2) **Drain.** Granular material, pipes, or other devices, alone or in combination used to collect, transport, and discharge water and/or to relieve pore or uplift pressure in the dam or its foundation. The rate of discharge must be sufficiently large to prevent excess pressure development in the drain or in adjacent media. In specific cases, the filter, either fine (commonly sand with some gravel) or coarse (principally gravel sizes), may also function as a drain.

3) **Base.** A zone or material which requires protection by a filter. This may include core zones, fine and coarse filters, and drains depending on the geometry and zoning of the dam. Thus, the base is always the protected material; the filter is

matériau qui est protégé; le filtre est le matériau de protection. Dans les barrages en remblai, il faut mettre en place les matériaux contigus selon des granulométries compatibles, c'est-à-dire le matériau grossier est le filtre du matériau adjacent plus fin. La lettre « d » désigne la dimension de particule du matériau de base; par exemple, d_{15} est la dimension pour laquelle 15 % en poids de l'ensemble des particules sont inférieurs.

4) **Système filtre/drain.** Matériaux granulaires, utilisés seuls ou combinés, fonctionnant comme filtre ou drain dans le corps du barrage ou sa fondation.

5) La « **dimension d'ouverture** » ou de « **resserrement** » des filtres est définie par le diamètre de la plus grande sphère qui passe dans un resserrement donné. Donc, pour un milieu de sphères uniforme et bien compacté, la dimension de resserrement, D_c , correspond à 0,16 fois le diamètre D des sphères. La « **dimension de resserrement de contrôle** » (D_c^*) est celle définie par la plus grande dimension de particule qui peut migrer au travers d'un filtre d'épaisseur donnée (Kenney et al, 1985; Sherard et al 1984 a et b). Ces dimensions dépendent aussi de C_u , le coefficient d'uniformité, et de la porosité, n .

6) La **rétenion** des particules solides est l'entrave qu'ont les particules détachables du matériau de base pour migrer à travers les ouvertures du filtre. La vérification du critère de rétenion consiste à comparer les dimensions d'ouverture des filtres, le plus souvent la dimension D_{15} , avec la dimension représentative du matériau de base.

7) **Renard.** Érosion interne des particules solides d'un barrage ou de sa fondation.

8) **Rupture par renard.** Érosion interne substantielle dans le temps, qui conduit à la perte de matériau à un rythme inacceptable et, à l'extrême, met en jeu la stabilité ou la fonction de l'ouvrage.

9) **Stabilité interne.** La capacité d'un sol à contenir la migration de ses propres particules fines lors d'une perturbation, telle qu'une percolation ou une vibration (Kenney et Lau, 1985). Lorsqu'à la mise en place il y a ségrégation des fractions fines et grossières, le matériau devient alors prédisposé à une instabilité interne.

10) **Colmatage.** La rétenion de particules fines dans le filtre, menant à une diminution importante de la perméabilité à l'interface du filtre et du matériau de base.

11) **Auto-colmatage.** La rétenion de particules fines à l'intérieur d'un matériau de base instable près de l'interface avec le filtre.

12) **Effet voûte.** La capacité du matériau de base à retenir ses propres particules fines près de son interface avec le filtre. Ce mécanisme implique la migration de particules fines dans le filtre. La Fig. A-1 illustre les changements de granulométrie qui se font près de l'interface contre le milieu où se développe l'effet voûte. Dans cette Fig., la couche 1 a perdu ses fines à travers le tamis, a une granulométrie uniforme et une perméabilité plus élevée que les couches supérieures. Les matériaux au-dessus de la couche 1 contiennent progressivement plus de fines et présentent une perméabilité inférieure. Le système est en équilibre. Si, cependant, la dimension du tamis est augmentée à la base, la couche 1 et les couches supérieures vont perdre des particules et deviendront plus perméables (Lafleur et al, 1989).

the protecting material. In the embankment dam, gradation compatibility between contiguous materials must be achieved, i.e. the coarser material must be a filter for the adjacent finer material. The symbol “d” is used throughout to designate the base particle size, ie, d_{15} is the particle size for which 15 % by weight of particles are smaller.

4) **Filter/drain system.** Granular materials, used alone or in combination, functioning as filters and drains within the embankment dam or its foundation.

5) The “**opening size**” or “**constriction size**” of filters is defined as the diameter of the largest sphere that will pass through a particular constriction. Thus, for densely packed uniform spheres, the constriction size, D_c , is equal to 0.16 times the diameter, D , of the spheres. The “**controlling constriction size**” (D_c^*) is defined as the maximum possible size of particle that can be transported through a filter of specific thickness (Kenney et al, 1985; Sherard et al, 1984 a and b). These several sizes are also dependent on the Uniformity Coefficient, C_u , and on the porosity, n .

6) **Retention** of solid particles is the hindrance of detachable particles of the base to move through the openings of the filter. Checking the retention criterion consists of comparing filter opening size, most often the D_{15} size, with a representative size of the base.

7) **Piping.** Internal erosion of solid particles within the dam or its foundation.

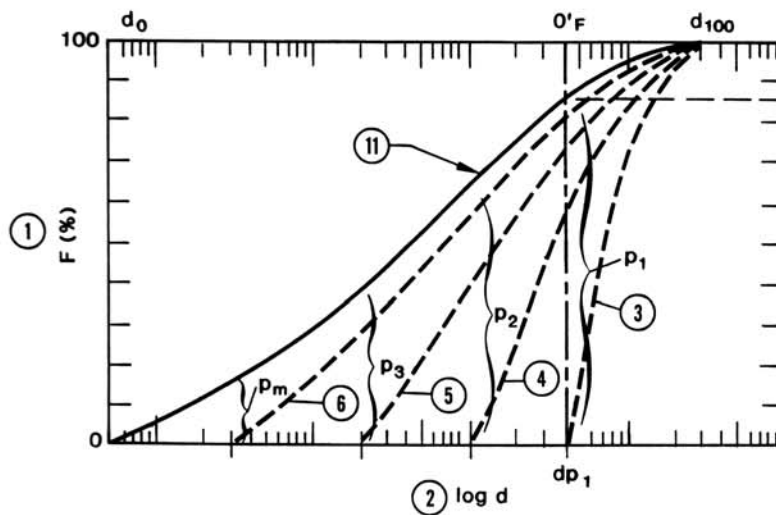
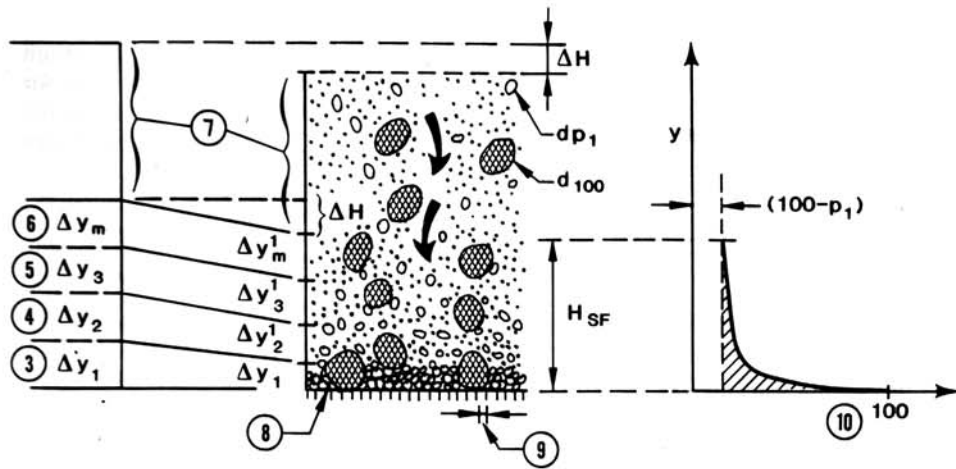
8) **Piping failure.** Substantial piping continuing with time resulting in the loss of material to an unacceptable degree, in the extreme, jeopardizing the stability or function of the structure.

9) **Internal stability.** The ability of a soil to prevent internal migration of its own fine particles as a result of disturbance such as seepage and/or vibration (Kenney and Lau, 1985). When segregation of the fine and coarse fractions occurs during fill placement, the material becomes more susceptible to internal instability.

10) **Clogging.** The entrapment of fine base particles in the filter leading to a significant decrease in permeability at the base-filter interface.

11) **Self-clogging.** The entrapment of the fine particles of an internally unstable base within itself near the base-filter interface.

12) **Bridging.** The ability of a base to retain its own finer particles near the base-filter interface. This mechanism involves migration of the finer particles in the filter. Fig. A-1 illustrates the changes in gradation that take place near the interface upon bridging. In this Fig., Layer 1 has lost its fine fraction through the screen, has a uniform gradation, and a higher permeability than the layers above. Materials above Layer 1 contain progressively more fines and lower permeability. The system is in equilibrium. If, however, the boundary screen size is increased, Layer 1 and all layers above Layer 1 would lose more material and become more permeable (Lafleur et al, 1989).



13) **Autocicatrisation.** La capacité du matériau de base à atteindre l'équilibre de ses particules près de l'interface avec le filtre, après un effondrement d'une fissure interne ou d'une cavité (Sherard and Dunnigan, 1989).

14) **Sol à granulométrie discontinue.** Sol où des particules de certaines dimensions manquent dans sa courbe granulométrique.

Fig. A-1

Bridging induced by downward flow and changes in gradation near the base/filter interface
(Lafleur, et al., 1989).

*Voûte produite par un écoulement descendant et des changements de granulométrie
près de l'interface matériau de base/filtre (Lafleur, et al., 1989).*

- | | |
|---|---|
| (1) Percent finer by weight. | (1) <i>Pourcentage passant (en poids).</i> |
| (2) Log of grain size, d . | (2) <i>Log de la dimension des particules, d.</i> |
| (3) Layer 1. | (3) <i>Couche 1.</i> |
| (4) Layer 2. | (4) <i>Couche 2.</i> |
| (5) Layer 3. | (5) <i>Couche 3.</i> |
| (6) Layer m . | (6) <i>Couche m.</i> |
| (7) Material not affected by self-filtration. | (7) <i>Matériau non influencé par l'autofiltration.</i> |
| (8) Interface. | (8) <i>Interface.</i> |
| (9) Filter opening size, O'_f . | (9) <i>Dimension d'ouverture du filtre, O'_f.</i> |
| (10) Percent in mass coarser than O'_f . | (10) <i>Pourcentage (en masse) plus grossier que O'_f.</i> |
| (11) Original gradation. | (11) <i>Granulométrie initiale.</i> |

13) **Self-healing.** The ability of a base near the base-filter interface to attain equilibrium of its particles, after the collapse of an inside crack or cavity (Sherard and Dunnigan, 1989).

14) **Gap-graded soils.** Some particles within a range of sizes are missing.

QUESTIONNAIRE ET RÉPONSES

TABLE DES MATIÈRES

Réponses de Comités Nationaux :

Australie
Colombie
Chypre
Égypte
Finlande
France
Allemagne
Japon
Corée
Maroc
Pays-Bas
Nouvelle-Zélande
Norvège
Russie
Afrique du Sud
Sri Lanka
Thaïlande
Zimbabwe

Réponses d'Organismes :

Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Portugal
New South Wales Public Works Department, Australie
Ministry of Water and Power, Pakistan
Tennessee Valley Authority, États-Unis
United States Bureau of Reclamation, États-Unis

Réponses individuelles :

Abadjiev, Christo B.
Brauns, Josef
Bravo Guillen, Guillermo
Cedergren, Harry
Creegan, Pat
Dascal, Oscar
de Mello, Prof. Victor F. B.
Domer, Ronald

QUESTIONNAIRE AND RESPONSES

TABLE OF CONTENTS

Responses from National Committees :

Australia
 Colombia
 Cyprus
 Egypt
 Finland
 France
 Germany
 Japan
 Korea
 Morocco
 Netherlands
 New Zealand
 Norway
 Russia
 South Africa
 Sri Lanka
 Thailand
 Zimbabwe

Responses from Agencies :

Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Portugal
 New South Wales Public Works Department, Australia
 Ministry of Water and Power, Pakistan
 Tennessee Valley Authority, USA
 United States Bureau of Reclamation, USA

Responses from Individuals :

Abadjiev, Christo B.
 Brauns, Josef
 Bravo Guillen, Guillermo
 Cedergren, Harry
 Creegan, Pat
 Dascal, Oscar
 de Mello, Prof. Victor F. B.
 Domer, Ronald

Galloway, John H. H.
 Harlan, Richard C.
 Hoeg, Kaare
 Honjo, Yusuke
 Ingles, Owen
 Jansen, Robert B.
 Kenney, T. C.
 Kleiner, David
 Lafleur, Jean
 Lowe, John
 E. Maranha das Neves
 Patrick, James G.
 Perry, Edward
 Post, Georges
 Ripley, Charles F.
 Seemel, Richard N.
 Sierra, Jesus Maria
 Sowers, George
 Talbot, James R.
 Thanikachalam, V.
 Vick, Steven G.

Réponses d'États des États-Unis d'Amérique :

Californie
 Colorado
 Kansas
 Louisiane
 Michigan
 Caroline du Nord
 Pennsylvanie
 Tennessee
 Wyoming

Galloway, John H. H.	
Harlan, Richard C.	
Hoeg, Kaare	
Honjo, Yusuke	
Ingles, Owen	
Jansen, Robert B.	
Kenney, T. C.	
Kleiner, David	
Lafleur, Jean	
Lowe, John	
E. Maranha das Neves	
Patrick, James G.	
Perry, Edward	
Post, Georges	
Ripley, Charles F.	
Seemel, Richard N.	
Sierra, Jesus Maria	
Sowers, George	
Talbot, James R.	
Thanikachalam, V.	
Vick, Steven G.	

Responses from States of the United States of America :

California	
Colorado	
Kansas	
Louisiana	
Michigan	
North Carolina	
Pennsylvania	
Tennessee	
Wyoming	

QUESTIONNAIRE

Le questionnaire qui suit sur l'usage des filtres granulaires dans les barrages en remblai fut transmis à environ trois cents (300) comités nationaux, organismes et personnes, en août 1990. Cette annexe résume les réponses au questionnaire :

A. Décrire l'évolution de la conception et de la construction des filtres dans votre organisation. Transmettre des copies des références disponibles sur ce sujet.

B. Commenter les spécifications de conception et les techniques de construction utilisées dans votre organisation. Transmettre des copies de vos manuels de conception, notes techniques, normes de conception, cahiers des charges, etc. Inclure des dessins types et des courbes granulométriques des matériaux de filtre et des sols protégés.

C. Exemples. Transmettre des références disponibles sur le sujet. Inclure les dessins types et les courbes granulométriques des matériaux de filtre et des sols protégés.

D. Transmettre les points de vue controversés pour discussion. Transmettre des copies de références sur le sujet.

QUESTIONNAIRE

The following questionnaire on the use of granular filters in fill dams was sent to approximately 300 national committees, agencies, organizations and individuals during August, 1990. The responses to the questionnaire are summarized in this appendix :

A. Describe the evolution of filter design and construction within your organization. Send copies of available references on this subject.

B. Comment on the design requirements and construction practices used within your organization. Send copies of design manuals, technical memoranda, design standards, specifications, etc. Include typical drawings and gradation curves for filter material and protected soil.

C. Case Histories. Send copies of available references on this subject. Include typical drawings and gradation curves for filter material and protected soil.

D. " Controversial " issues for discussion. Send copies of available references on this subject.

RÉPONSES DES COMITÉS NATIONAUX

AUSTRALIE, COMITÉ NATIONAL

L. A. McDonald
Dams Section
Public Works Department, NSW
164-174 Liverpool Road
Ashfield NSW 2131
Australie

Cette réponse fournit des commentaires sur la première ébauche de ce bulletin et fait part d'informations provenant d'ingénieurs, d'organismes et d'entreprises de construction australiens. Elle présente des commentaires concernant la structure du bulletin, des suggestions en ce qui concerne l'importance des aspects liés à la construction, ainsi que des commentaires sur l'épaisseur minimale des filtres.

Ce qui suit résume l'expérience australienne :

« D'une façon générale, la conception des filtres a été basée sur la relation $D_{15}/d_{85} \leq 5$ et moins de 5 % des particules passant le tamis de 75 μm , avec une tendance à utiliser le critère courant de Sherard (SCS, 1986; USBR 1987). Les autres spécifications prescrivent :

a) que les particules du filtre soient dures et durables, excluant l'éventualité de cimentation ou de cohésion;

b) que les essais de laboratoire sur la capacité de rétention du filtre soient considérés pour les matériaux de filtre dont les particules angulaires, allongées présentent de grands indices de vide; et aussi pour les filtres de protection au contact de surfaces lisses (mur de béton, etc.) où les espaces vides peuvent être plus élevés et être préoccupants étant donné l'existence d'un contact linéaire lisse.

Les cahiers des charges demandent habituellement que les matériaux soient mis en place avec une densité relative de 70 % (ou indice de densité), et que soient évitées la ségrégation et la contamination des matériaux.

Les géotextiles ont été utilisés de temps à autre sous le riprap, alors qu'ils ne sont pas du tout utilisés pour les éléments importants des grands barrages, comme les filtres internes; ce qui est rapporté, par exemple, par *ACT Electricity and Water*. Les géotextiles ont été utilisés pour d'autres zones moins critiques des barrages, comme au barrage Googong (ACT E & I), pour constituer le matériau de séparation pour le tuyau et les drains de gravier, et pour continuer le drainage d'une couche graveleuse dans le radier lors de l'extension du barrage en remblai Dungowan (New South Wales, Public Works Department).

Le Département des Travaux Publics, NSW, a porté une attention spéciale à l'aptitude des filtres à drainer les débits de fuites pour les barrages zonés en terre, selon les idées préconisées par Harry Cedergren. »

RESPONSES FROM NATIONAL COMMITTEES

AUSTRALIA, NATIONAL COMMITTEE

L. A. McDonald
Dams Section
Public Works Department, NSW
164-174 Liverpool Road
Ashfield NSW 2131
Australia

The response provides review comments on the first draft and submits input from several consulting engineers, agencies, and contractors in Australia. Comments relating to the organization of the bulletin, suggestions regarding a stronger emphasis on construction aspects, and comments on minimum thicknesses of filters are presented.

The following summarizes Australian practice :

“ Generally in Australia the filter design has been based on $D_{15}/d_{85} \leq 5$ and not more than 5 % passing the 75 μm sieve, with a trend towards the current Sherard (SCS, 1986; USBR, 1987) criteria. Additional requirements are :

a) that the particles of filter material should be hard and durable with no potential for cementation or cohesion;

b) laboratory testing of the filter retention capability be considered for highly dispersive core materials or for filters with angular/elongated particles favoring high void ratios; also for filter protection at smooth boundaries (concrete walls, etc.) where void spaces may be larger and of concern due to the smooth linear boundary.

Specifications for placement usually call for 70 % relative density (or density index), and the avoidance of segregation and contamination.

Whereas geotextiles are not used for critically important features such as internal filters on large dams, there has been isolated use under rip-rap; for example, as recorded by ACT Electricity and Water. Geotextiles have been used in less critical areas of dams as a separation material for pipe and gravel drains as at Googong Dam wall raising (ACT E & I) and for a rock drain extending a naturally occurring gravel drainage layer a Dungowan Dam embankment extension (New South Wales, Public Works Department).

Public Works Department, NSW, has given attention to the flow discharge capacity of filters for zoned earth dams along the lines advocated by Harry Cedergren.”

Ci-dessous sont résumés des commentaires sélectionnés provenant des réponses :

A) Entreprise de construction Leighton :

De tous les matériaux variés qui composent un barrage en remblai, celui qui a le coût unitaire le plus élevé est le matériau de filtre sélectionné; donc il est important d'insister pour mettre en place ce filtre avec une largeur minimale. « Les filtres étroits constituent des exemples courants en Australie; il est facile de mettre en place deux zones adjacentes de 1,5 m de largeur avec un camion équipé d'une benne subdivisée en deux par une plaque centrale. Pour que le concepteur accepte des filtres étroits, il faut qu'il ait confiance dans l'entrepreneur pour les mettre en place avec uniformité et exactitude; l'usage de boîtes d'épandage ou de guides d'épandage attachés aux camions à benne basculante a été très persuasif au cours de ces dix à quinze dernières années. »

B) Water Authority of Western Australia :

Deux cas sont présentés :

Le barrage Harding, West Pilbara

C'est un barrage en enrochement construit en 1983/84 par la *Water Authority*, dont le noyau d'argile est constitué de terre, partiellement dispersive (réf. : AN-COLD Bulletin n° 67, avril 1984). Des filtres entièrement fabriqués furent utilisés pour prévenir le développement de rupture par *renard*. La conception initiale du filtre était une modification des pratiques utilisées pour les sols pulvérulents par l'*USBR* et l'*US Army Corps of Engineers* :

(1) Spécifications de perméabilité :

$D_{15}/d_{15} > 5$ à condition que le filtre contienne moins de 5 % de particules fines et soit non plastique.

(2) Rapport d'érosion interne :

$$D_{15}/d_{85} < 5$$

(3) Limite grossière du D_{15} du filtre :

$< 49 \times d_{15}$ du matériau protégé (critère de Karpov)

$< 5 < d_{85}$ du matériau protégé (USBR)

(4) Les courbes granulométriques du filtre et du matériau protégé seront pratiquement parallèles.

Le critère (2) a été satisfait par un D_{15} du filtre égal à 0,4 mm, tandis que le premier critère de Karpov exige un D_{15} du filtre plus petit que 0,2 mm. Le critère moins restrictif de l'*US Army Corps of Engineers*, plus approprié pour les argiles que pour les sols pulvérulents, a été adopté : à savoir, un D_{15} du filtre jusqu'à 0,4 mm qui fournit un filtre de bonne granulométrie, avec un coefficient d'uniformité < 20 , et qui respecte les limites proposées par le critère (2) du rapport d'érosion interne.

Summaries of selected comments from the response follow :

A) Leighton Contractors :

Processed filter material is the highest unit cost of the various materials within a fill dam, thus the emphasis on the minimum acceptable width. " Examples of narrow filters are common in Australia; it is easy to place two adjacent 1.5 m wide zones from the tray of a highway truck with a central dividing plate. Acceptance of narrow filter zones requires confidence on the part of the designer as to the consistency and accuracy of placing by the Contractor, and use of spreader boxes or spreading guides attached to the tray of tip trucks have been very persuasive in the past 10-15 years. "

B) Water Authority of Western Australia :

Two case histories are presented :

Harding Dam, West Pilbara

A rockfill dam constructed by the *Water Authority* in 1983/4 made use of partly dispersive earthfill material for the clay core (ref : ANCOLD Bulletin No. 67, April 1984). Fully processed filters were used to prevent the development of piping failure. Initial filter design was a modification of the USBR and US Army Corps of Engineers practice for cohesionless soils :

(1) Permeability requirement :

$D_{15}/d_{15} > 5$ provided fines content of filter is $< 5\%$ and non plastic.

(2) Piping ratio :

$D_{15}/d_{85} < 5$

(3) Coarse limit of D_{15} filter :

$< 49 \times d_{15}$ base (Karpov's criteria)

$< 5 \times d_{85}$ base (USBR)

(4) Grading curves to be roughly parallel.

Criterion (2) was satisfied by D_{15} filter = 0.4 mm, however Karpov's 1st criterion gave a requirement of D_{15} filter of < 0.2 mm. US Army Corps of Engineers' less restrictive criteria appropriate to clays rather than cohesionless soils were adopted : namely D_{15} filter of up to 0.4 mm provided a well graded filter with uniformity coeff of < 20 is used and limits on piping ratio criterion (2) were observed.

En fonction des précisions mentionnées ci-dessus, on adopta 0,4 mm comme limite supérieure pour le D_{15} du filtre dans la conception.

L'article de Vaughan et Soares (ASCE, janvier 1982) proposant le concept d'un filtre parfait a été à l'origine d'une série d'essais maison en laboratoire pour vérifier cette conception de filtre. Il résulte de leurs travaux et recommandations qu'on ne doit pas demander au noyau d'être autofiltrant et qu'un filtre ayant un D_{15} de 0,4 mm ne peut retenir des particules inférieures à 30 μm . Il est évident qu'une argile dispersive possède des particules aussi petites que 1 à 2 μm et qu'elles peuvent s'échapper à travers tout filtre protecteur.

Une série d'essais d'érosion sur des fissures ont alors été exécutés, utilisant une variété de sols et de liquides d'essai incluant des agents dispersants. Dans tous les cas, l'écoulement par la fissure s'est arrêté avant deux heures – dans la majorité des cas, à cause de l'effondrement de la fissure créant un amoncellement de particules du noyau à la surface du filtre. Lors de l'essai avec de l'eau contenant un agent dispersant (simulation d'une situation d'un sol dispersif), la fissure est demeurée ouverte, mais le filtre s'est obstrué ou colmaté par la pénétration de particules fines dispersées.

Une série d'essais avec boue a été réalisée pour étudier les effets de filtre sur un matériau de noyau le plus dispersif possible. Lors de ces essais, le matériau de filtre fin a été chargé à l'aide d'un mélange liquide/solide de 20 à 1 dans un appareil à charge hydraulique décroissante. Le même essai fut exécuté plusieurs fois avec ou sans agent dispersant et sur des fractions d'échantillon contenant toute la gamme des particules ou seulement les fines.

Les fines ont pénétré dans le filtre lors de l'utilisation d'un agent dispersant, obstruant et colmatant rapidement le filtre dont la perméabilité est passée de 10^{-1} m/s à 10^{-6} m/s. En comparaison, pour les essais sans utilisation d'agent dispersant, la perméabilité du filtre n'a été réduite qu'à 5×10^{-5} m/s, les matériaux du noyau ayant pénétré dans le filtre et s'étant accumulés à la surface de celui-ci. Dans tous les cas, seule une infime partie a complètement traversé la couche de filtre et, là où le matériau du noyau s'est véritablement dispersé, la couche filtrante s'est rapidement obstruée et colmatée.

Nous avons conclu que le matériau du noyau avait une granulométrie convenable et que, même avec la présence de particules fines dispersives, le matériau était pratiquement autofiltrant, c'est-à-dire qu'il construirait à la surface ou immédiatement près du contact avec le filtre sa propre peau de silt et de sable fin.

Les résultats de Sherard, identiques mais beaucoup plus complets sur les essais de filtres protecteurs pour les silts et les argiles, ont été publiés peu après les essais précités (ASCE, juin 1984).

Les conclusions de Sherard indiquant que : pour les argiles fines, un filtre sablonneux avec un D_{15} égal à 0,5 mm était une approche prudente; pour les argiles sablonneuses et les silts, le rapport $D_{15}/d_{85} < 5$ était une approche prudente et raisonnable... ont donné du poids aux résultats provenant de nos essais maison et ont aidé à confirmer que notre conception de filtre était adéquate.

Les relevés de fuites et de pressions interstitielles pendant la période d'exploitation n'ont révélé aucun signe montrant que les filtres ne fonctionnaient pas de façon satisfaisante.

Based on the above, an upper limit for D_{15} filter of 0.4 mm was adopted in the preliminary design.

Vaughan & Soares paper (ASCE, Jan 82) on the concept of a perfect filter prompted a series of 'in house' lab tests to verify the proposed filter design. Based on their work/recommendations, no allowance should be made for self filtering by the core material and a D_{15} filter of 0.4 mm would not be capable of retaining particles smaller than 30 μm . Clearly a dispersed clay would exist as particles as small as 1-2 μm and could be expected to escape through any protective filters.

A series of crack erosion tests were therefore performed, using a variety of soils and test liquids including dispersing agent. In all cases, flow through the crack dropped off within 2 hours - in most cases due to collapse of the crack causing a build up of core material on the surface of the filter. In the test using water containing dispersing agent (simulating a dispersive soil situation), the crack remained open but dispersed fines penetrated and clogged/sealed off the filter.

A series of slurry tests were then carried out to examine filtration effects on a more truly dispersed core material. In these fine filter material was loaded with head of 20 : 1 liquid : soil slurry in a falling head apparatus. The test was performed several times with and without dispersing agent and on 'total' and 'fines only' soil fractions.

With dispersing agent, fines penetrated the filter medium, leading to a rapid clogging and sealing off of the filter causing filter permeability to drop from 10^{-1} m/s to 10^{-6} m/s. By comparison, in tests without dispersing agent, core material penetrated and built up on the filter layer but reduced the permeability to 5×10^{-5} m/s only and filter discharge was relatively clean. In all cases, only a very small fraction of total solids passed through the filter layer and where the core material was truly dispersed, the filter layer was rapidly clogged and sealed off.

We concluded that the core material was sufficiently well graded that even with dispersive fines present, the material was likely in practice to be self filtering i.e., would build up its own skin of silt and fine sand size particles on/within the surface of sand filter layer.

Shortly after completion of the above testing, the results of Sherard's similar but far more comprehensive work on tests for protective filters for silts and clays were published (ASCE, June 1984).

Sherard's conclusions that : for fine grained clays, a sand filter D_{15} of 0.5 mm was conservative; for sandy clays and silts, $D_{15}/d_{85} < 5$ was conservative and reasonable... lent weight to the findings of our 'in house' testing and helped confirm the adequacy of our filter design.

In subsequent operation of the dam, seepage and core pore pressure monitoring have not revealed any signs that the filters are not performing satisfactorily.

Barrage Harris, South-West of WA

Un barrage en terre homogène de 37 m de hauteur fut construit en 1988 par la *Water Authority*, incorporant un filtre-cheminée pratiquement vertical en sable ainsi qu'un tapis drainant à l'aval (réf. : ANCOLD, Bulletin n° 88, août 1991).

La conception du filtre à la fois pour le filtre cheminée et le tapis de drainage était basée sur les pratiques de l'*USBR* (critères (1) et (2) ci-dessus mentionnés) comme pour le barrage Harding; mais, comme le matériau n'était pas dispersif et que l'étanchéité ne dépendait pas d'un mince noyau d'argile, nous n'avions pas la même préoccupation de retenir les particules. Un filtre défini par un D_{15} de 0,4 mm fut adopté, répondant parfaitement aux recommandations de l'*US Corps of Engineers* et de Sherard (voir ci-dessus).

Durant la construction, seuls quelques problèmes mineurs ont été rencontrés alors que, depuis que le réservoir est en exploitation, aucun problème n'a été identifié.

C) Rural Water Commission of Victoria :

« La *Rural Water Commission* a adopté pour les filtres fins et grossiers les critères de conception basés sur les règles de l'*USBR* et de l'*US COE* »...

Les filtres fins adoptés dans des projets récents étaient composés de sable de quartz provenant de rivières ou de zones d'anciens ruisseaux. La Commission préférait ce genre de filtre, compte tenu que c'est un sable habituellement de granulométrie moyenne à grossière, qui n'est pas prédisposé à la ségrégation ou à se détériorer durant sa manipulation. La perméabilité de ces filtres par rapport à celle des zones d'argile protégées est de 2 à 3 ordres de grandeur supérieure. L'indice de condition de renard ou le rapport d'érosion interne a été typiquement inférieur à 1, fournissant donc un filtre très prudent (indice de condition de renard D_{15}/d_{85}).

Les filtres grossiers utilisés étaient composés de matériaux rocheux concassés, d'origine ignée ou métamorphique, choisis pour leur résistance et leur dureté. Leurs indices de condition de renard se sont révélés aussi inférieurs à 1.

Selon la géométrie du remblai, les techniques de construction des zones de filtres variaient. Lorsque les filtres étaient placés sur des pentes supérieures à 1 : 0,5 (V : H), la mise en place comportait l'utilisation de boîtes d'épandage pour les filtres fins, ou bien de boîtes d'épandage ou de camions à déversement par le fond pour les filtres grossiers. Un compactage minimal a été exigé pour les filtres; cependant, celui-ci a été bien surveillé pour s'assurer que la rigidité des filtres n'était pas supérieure à celles des terres et enrochements adjacents.

Dans les zones où les pentes sur lesquelles s'appuyaient les filtres étaient inférieures à 1 : 0,5, ceux-ci étaient mis en place avec des chargeurs à benne avant et des camions équipés de dispositifs de décharge latérale. Aucun compactage n'était exigé, du fait que le compactage résultant de la mise en place des couches sus-jacentes était considéré comme satisfaisant.

Le contrôle de ces récents aménagements indique un comportement satisfaisant des filtres.

Harris Dam, South-West of WA

An 37 m high homogeneous earthfill dam constructed by the Water Authority in 1988 and incorporating a near vertical chimney sand filter and a downstream drainage blanket (ref : ANCOLD Bulletin No. 88, Aug 1991).

Filter design for both chimney filter and drainage blanket was based on USBR practice (Criteria (1) and (2) above) as for Harding Dam but since the earthfill was non-dispersive and watertightness not dependent on a thin clay core, there was not quite the same concern about particle retention. A D_{15} filter size of 0.4 mm was adopted as being largely in line with US Corps of Engineers and Sherard's recommendations (see above).

Only minor problems were encountered during construction and no problems have come to light since operation of the reservoir.

C) Rural Water Commission of Victoria :

"The design criteria adopted by the Rural Water Commission for fine and coarse filters is based on the USBR and US COE procedures."...

The fine filters used in recent projects comprise quartz sands from river or prior stream environments. The Commission has a preference for this type of filter since it generally results in a uniform medium to coarse sand which is not prone to segregation or breakdown during handling. The permeability of these sand filters is typically 2 to 3 orders of magnitude higher than the clay zones being protected. The Piping Ratio has typically been less than one, hence a very conservative filter. (Note : Piping Ratio D_{15}/d_{85}).

The coarse filters used comprise processed rock materials of igneous or metamorphic origin for durability and hardness. Piping Ratios for these filters have also typically been less than one.

Construction techniques for the filter zones varies subject to embankment geometry. Where the filters are placed on a slope steeper than 1 : 0.5 (V : H), placement has involved the use of spreader boxes for fine filters and either spreader boxes or bottom-dump trucks for coarse filters. Nominal compaction of the filters has been specified, however this is closely monitored to ensure filter stiffness is not greater than adjacent earth and rockfill zones.

Where filters are placed on slopes flatter than 1 : 0.5, placement has involved the use of front end loaders and trucks fitted with side-discharging conveyor. No direct compaction has been specified, indirect compaction during the placement of overlying materials being considered adequate.

Performance monitoring of recent projects has indicated satisfactory performance of the filters.

En ce qui concerne les modifications des pratiques existantes de conception des filtres, la Commission aimerait en tenir compte de façon prudente, en particulier si l'intention est de préparer des filtres plus efficaces et donc moins indulgents. Il serait approprié de continuer à suivre une approche prudente pour la conception des filtres des grands barrages pour lesquels les risques sont élevés. La possibilité de se servir de filtres plus efficaces est peut-être plus facile dans le cas de barrages où le risque est moins élevé.

Les observations et les pratiques décrites dans le chapitre « Technique actuelle » sont conformes à celles que la Commission a suivies.

COLOMBIE, COMITÉ NATIONAL

Alberto Marulanda P.
Ingetec S.A.
Carrera 61. N° 30A-30
Aptdo. Aereo 5099
Bogota
Colombie

Marulanda signale dans la lettre soumettant sa réponse :

« Il me semble que ce rapport sera une très bonne opportunité de mettre en valeur l'utilisation de filtres dans les barrages en remblai, non seulement en relation avec le noyau du barrage lui-même, mais aussi pour la protection des appuis rocheux. Ceci peut s'appliquer, soit à un appui rocheux fragile, soit à des accidents particuliers dans les appuis, nécessitant l'utilisation de filtres à leur affleurement dans le canyon. »

Le rapport soumis présente un sommaire de l'évolution de la conception des filtres en Colombie. La pratique actuelle suit les travaux de recherche de Sherard et de l'*US Soil Conservation Service*.

Marulanda présente l'épaisseur minimale des filtres comme suit :

- 1) 0,6 m pour les filtres horizontaux.
- 2) 1 m pour les filtres en contact avec les appuis.
- 3) 2 m pour les filtres placés contre les noyaux imperméables, ceci pour éviter la ségrégation et pour faciliter la mise en place, l'épandage et le compactage.

La préoccupation au sujet de la ségrégation durant la construction a conduit à des changements majeurs relativement à la dimension maximale granulométrique des matériaux des filtres adjacents aux noyaux imperméables, c'est-à-dire de 15 cm au barrage Chivor (237 m de haut, 1975) à 1,9 cm au barrage Guavio (248 m de haut, 1989). Ces deux ouvrages sont en enrochement avec un noyau étanche en argile.

Le rapport présente des exemples détaillés pour les barrages suivants :

- 1) Sesquile, fondé sur un dépôt d'alluvions de 70 m d'épaisseur.
- 2) Chivor et Guavio, deux barrages en enrochement avec noyau incliné en argile.
- 3) Golillas et Salvajina, deux barrages en enrochement avec masque amont en béton.

With regard to modifications to the existing practice of filter design the Commission would approach this with some caution if the intention is to make filters more efficient and hence less forgiving. The continued use of a conservative filter design approach on large dams of high hazard rating would be appropriate. The possibility of introducing more efficient filters in referable or significant dams of lesser hazard rating may be feasible.

The observations and practices described under "Current State of the Practice" are consistent with those observed by the Commission.

COLOMBIA, NATIONAL COMMITTEE

Alberto Marulanda P.
Ingetec S. A.
Carrera 61. No. 30A-30
Apto. Aereo 5099
Bogota
Colombia

In the cover letter, submitting the response, Marulanda states :

" It seems to me that this report will be a very good opportunity to emphasize the use of filters in fill dams, not only with respect to the core of the dam itself, but also the extension of these filters to protect the abutments. This can be for either a very weak abutment or particular features in the abutments that require the use of filters at their outcrop in the canyon. "

The submittal presents a summary of the evolution of filter design in Colombia. Current practice follows the research work of Sherard and the US Soil Conservation Service.

Marulanda presents minimum thickness for filters :

- 1) 0.6 m for horizontal filters.
- 2) 1 m for filters in contact with abutment slopes.
- 3) 2 m for filter placed adjacent to the impervious core to avoid segregation and to facilitate placement, spreading and compaction.

Concern about filter segregation during construction has led to major changes to the maximum aggregate size of filter material placed against the impervious core i.e., from 15 cm at Chivor (237 m high, 1975) to 1.9 cm at Guavio (248 m high, 1989). Both of these structures are clay core rockfill dams.

Detailed case histories are presented for the following dams :

- 1) Sesquile Dam, founded on a 70 m thick alluvial deposit.
- 2) Chivor and Guavio, both clayey inclined core rockfill dams.
- 3) Golillas and Salvajina, both concrete faced rockfill dams.

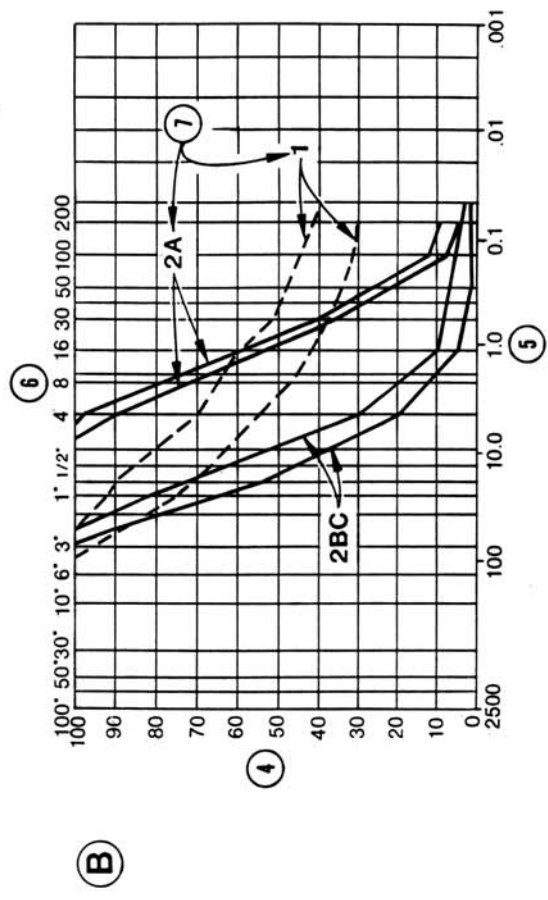
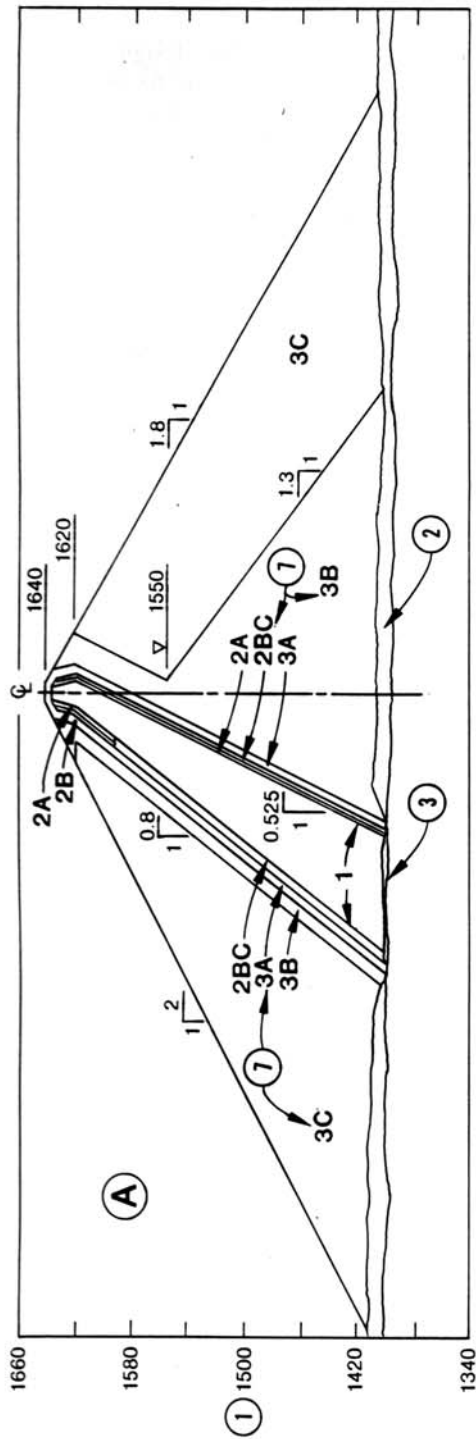


Fig. B-1

Guavio dam - Maximum cross section (Colombia, National Committee response, 1990).
Barrage de Guavio - Coupe transversale maximale (Colombie, réponse du Comité National, 1990).

- (A) Maximum section.
- (B) Gradation limits.
- (1) Elevation in meters.
- (2) Alluvial material left in place.
- (3) Concrete base.
- (4) Percent finer by weight.
- (5) Grain size in mm.
- (6) US standard sieve size.
- (7) Numbering of zones in the dam.

- (A) *Coupe transversale maximale.*
- (B) *Limites granulométriques.*
- (1) *Cote en m.*
- (2) *Matériau alluvionnaire, laissé en place.*
- (3) *Base en béton.*
- (4) *Pourcentage passant (en poids).*
- (5) *Dimension des grains, en mm.*
- (6) *Dimension des tamis standard US.*
- (7) *Numéro des zones dans le barrage.*

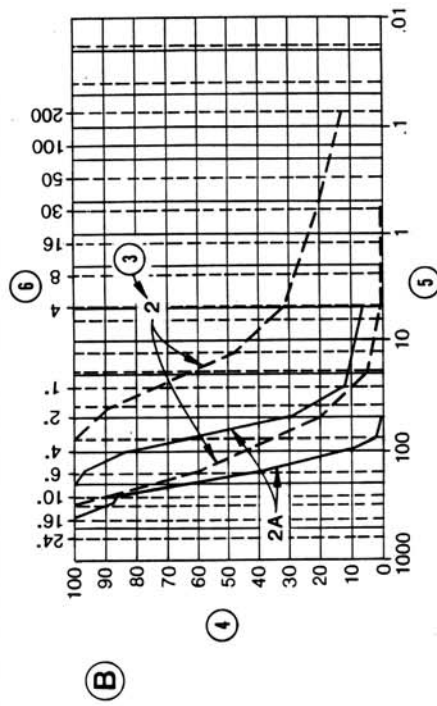
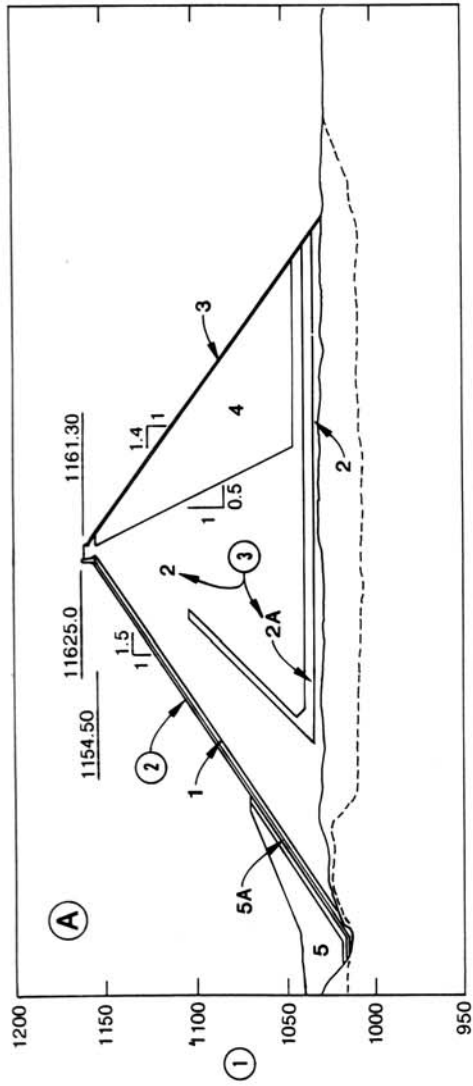


Fig. B-2

Salvajina dam - Maximum cross section (Colombia, National Committee response, 1990).
Barrage de Salvajina - Coupe transversale maximale (Colombie, réponse du Comité National, 1990).

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| (A) Maximum section. | (A) Coupe transversale maximale. |
| (B) Gradation limits. | (B) Limites granulométriques. |
| (1) Elevation in meters. | (1) Cote en m. |
| (2) Concrete face. | (2) Masque en béton. |
| (3) Numbering of zones in the dam. | (3) Numéro des zones dans le barrage. |
| (4) Percent finer by weight. | (4) Pourcentage passant (en poids). |
| (5) Grain size in mm. | (5) Dimension des particules, en mm. |
| (6) US standard sieve size. | (6) Dimension des tamis standard US. |

Notes :

Zone	2	2 A
Function	Gravel fill	Filter
Description	Natural gravels	Processed gravels
Maximum size	60 cm	60 cm
Lift thickness	60 cm	60 cm
Compaction	10 ton vibratory roller	10 ton vibratory roller
Passes per lift	Four	Four

Notes :

Zone	2	2 A
Fonction	Remblai en gravier	Filtere
Description	Gravier naturel	Gravier ayant subi un traitement
Dimension max.	60 cm	60 cm
Épaisseur de levée	60 cm	60 cm
Compactage	Rouleau vibrant 10 t	Rouleau vibrant 10 t
Passes par levée	4	4

L'utilisation inhabituelle de filtres aux barrages de Salvajina et Guavio incluait la protection des appuis. Sur ces deux barrages, des filtres sableux furent mis en place contre les appuis à l'aval du noyau, pour empêcher la migration des fines contenues dans les sols résiduels, le rocher altéré et les joints continus dans la fondation remplis de divers matériaux.

En Colombie, le contenu en fines des filtres fins est généralement inférieur à 2 %. Cependant, la manutention normale, la mise en place et le compactage produisent souvent un pourcentage de fines de 2 %. Au barrage de Guavio, le pourcentage passant le tamis n° 200 fut élargi à 5 % sans diminuer la performance du filtre. Le pourcentage maximal limite du contenu en fines fut augmenté à 7 % pour éviter les réclamations de l'entrepreneur et pour réduire les coûts de production.

Le rapport inclut aussi des figures, des références, ainsi que des dessins illustrant les caractéristiques des barrages de Chivor, Guavio, Golillas et Salvajina. Les références suivantes font partie du document :

Liste des références

- Terzaghi, Karl, 1929, « Effect of Minor Geologic Details on the Safety of Dams », *Bulletin*, American Institute of Mining Engineers, Technical Publication 215, Clas I, Mining Geology, n° 26, p. 31.
- Bertram, G. E., 1970, « An Experimental Investigation of Protective Filters », Harvard University Soil Mechanics Series, no. 7, janvier.
- Sherard, J. L., 1967, et al, « Earth and Earth-Rock Dams », John Wiley and Sons, Inc., Third Printing, avril.
- Sherard, J. L., 1977, « Sinkholes on Dams of Coarse Glacial Till and Other Broadly Graded Soils », Review of Experience and Need for Changes in Filter Criteria, Memorandum, juin.
- Sherard, J. L., 1981, « Study of Filters for Dams and Ideas on Potentially Useful Laboratory Tests to Clarify Questionable Points », Manuscript for Review and Comments, Rought Draft, mai.
- Vaughan, P. R., and Soares, H. F., 1982, « Design of Filters for Clay Cores of Dams », *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 108, n° GT1, janvier.
- Sherard J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R., 1984, « Basis Properties of Sand and Gravel Filters », *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, n° 6, juin.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R., 1984, « Filters for Silts and Clays », *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, n° 6, juin.
- Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P., 1989, « Critical Filters for Impervious Soils », *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, n° 7, juillet.
- Shuk, T., Cajiao, R., and Sierra, J. M., 1970, « Design, Construction and Performance of Sesquilé Dam », *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 96, SMI, janvier.
- Marulanda, A., Amaya, F., and Gomez, J. N., 1990, « Sesquilé Dam, Measures Adopted to Ensure Dynamic Stability Design, Construction and Performance », *Water Power-Dam Construction*, décembre.

Unusual uses of filters included the protection of the abutments at Salvajina and Guavio. At both of these dams, sandy filters were placed at the abutments, downstream from the impervious elements, to avoid possible migration of fines content from residual soils, weathered rocks, and in-filled continuous joints found in the foundation.

In Colombia, the fines content within the fine filter is generally limited to 2 %, however, normal handling, placement and compaction often produces fines of about 2 %. At Guavio, the limit was broadened to a maximum of 5 % passing the n° 200 sieve without altering the good performance of the filter. In order to avoid contractor claims and to reduce production costs the maximum upper limit of fines content was increased to 7 %.

The submittal includes figures, references and drawings illustrating the details of Chivor, Guavio, Golillas and Salvajina dams. The following references are listed :

List of references

- Terzaghi, Karl, 1929, "Effect of Minor Geologic Details on the Safety of Dams", *Bulletin*, American Institute of Mining Engineers, Technical Publication 215, Clas I, Mining Geology, No. 26, p. 31.
- Bertram, G. E., 1970, "An Experimental Investigation of Protective Filters", Harvard University Soil Mechanics Series, No. 7, January.
- Sherard, J. L., 1967, et al, "Earth and Earth-Rock Dams", John Wiley and Sons, Inc., Third Printing, April.
- Sherard, J. L., 1977, "Sinkholes on Dams of Coarse Glacial Till and Other Broadly Graded Soils", Review of Experience and Need for Changes in Filter Criteria, Memorandum, June.
- Sherard, J. L., 1981, "Study of Filters for Dams and Ideas on Potentially Useful Laboratory Tests to Clarify Questionable Points", Manuscript for Review and Comments, Rough Draft, May.
- Vaughan, P. R., and Soares, H. F., 1982, "Design of Filters for Clay Cores of Dams", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 108, No. GT1, January.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R., 1984, "Basic Properties of Sand and Gravel Filters", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 6, June.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R., 1984, "Filters for Silts and Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 6, June.
- Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P., 1989, "Critical Filters for Impervious Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 7, July.
- Shuk, T., Cajiao, R., and Sierra, J. M., 1970, "Design, Construction and Performance of Sesquilé Dam", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 96, SMI, January.
- Marulanda, A., Amaya, F., and Gomez, J. N., 1990, "Sesquilé Dam, Measures Adopted to Ensure Dynamic Stability Design, Construction and Performance", *Water Power-Dam Construction*, December.

- Sierra, J. M., and Buendia, J., 1975, « Presa La Esmeralda », V^o Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, Argentina.
- Marulanda, A., and Amaya, F., 1989, « Guavio Dam – Design and Construction », Water Power – Dam Construction, décembre.
- Hacelas, J. E., and Ramirez, C. A., 1986, « Salvajina : A Concrete-Faced Dam on a Difficult Foundation », Water Power – Dam Construction, juin.
- Sierra, J. M., Ramirez, C. A., and Hacelas, J. E., 1985, « Design Features of Salvajina Dam », *Proceedings*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance (Edited by J. Barry Cooke and J. L. Sherard) ASCE, Detroit, États-Unis, octobre.
- Amaya, F., and Marulanda, A., 1985, « Golillas Dam – Design, Construction, and Performance », *Proceedings*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance (Edited by J. Barry Cooke and J. L. Sherard) ASCE, Detroit, États-Unis, octobre.
- Hacelas, J. E., and Ramirez, C. A., 1984, « Instrumentacion en Presas de Enrocado », Primer Seminario Latinoamericano sobre Presas y Embalses, Marzo.

CHYPRE, COMITÉ NATIONAL

N. P. Stylianou, Secrétaire, CYNKOLD
 Ministère de l'Agriculture et des Ressources Naturelles
 Division de la Mise en Valeur des Ressources Hydrauliques
 Nicosie, Chypre

La réponse spécifie que la conception des filtres est basée sur une combinaison des résultats des travaux de Terzaghi, Sherard et Vaughan. Aucun manuel de conception n'est disponible.

ÉGYPTE, COMITÉ NATIONAL

E. M. Shalaby, Secrétaire Général
 Comité National Égyptien
 Ministère des Travaux Publics et des Ressources Hydrauliques
 Rue Kasr El-Einy
 Le Caire, Égypte

La réponse inclut des commentaires généraux et suggère plus particulièrement d'ajouter au contenu du Bulletin un chapitre portant sur la capacité du système filtre/drain à maintenir la ligne phréatique à l'intérieur du système de drainage et non à l'intérieur de la recharge aval, de sorte que les eaux de percolation ne sortent pas sur le talus aval. Rappelons que la réponse de Cedergren fait aussi ressortir ce point particulier.

La conception des filtres et les critères de construction ont évolué à la suite de la réalisation du Haut Barrage d'Assouan durant les années 1960. La conception des filtres, des données sur la construction et des dessins illustrant les détails des filtres pour le Haut Barrage d'Assouan sont inclus dans la réponse.

- Sierra, J. M., and Buendia, J., 1975, "Presa La Esmeralda", Vº Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, Argentina.
- Marulanda, A., and Amaya, F., 1989, "Guavio Dam - Design and Construction", Water Power - Dam Construction, December.
- Hacelas, J. E., and Ramirez, C. A., 1986, "Salvajina : A Concrete-Faced Dam on a Difficult Foundation", Water Power - Dam Construction, June.
- Sierra, J. M., Ramirez, C. A., and Hacelas, J. E., 1985, "Design Features of Salvajina Dam", *Proceedings*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction and Performance (Edited by J" Barry Cooke and J. L. Sherard) ASCE, Detroit, USA; October.
- Amaya, F., and Marulanda, A., 1985, "Golillas Dam - Design, Construction, and Performance", *Proceedings*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction and Performance (Edited by J. Barry Cooke and J. L. Sherard) ASCE, Detroit, USA; October.
- Hacelas, J. E., and Ramirez, C. A., 1984, "Instrumentacion en Presas de Enrocado", Primer Seminario Latinoamericano sobre Presas y Embalses, Marzo.

CYPRUS, NATIONAL COMMITTEE

N. P. Stylianou, Secretary, CYNOLD
 Ministry of Agriculture and Natural Resources
 Water Development Department
 Nicosia, Cyprus

The reply states that filter design is based on combinations of Terzaghi's, Sherard's and Vaughan's work. No design manuals are available.

EGYPT, NATIONAL COMMITTEE

E. M. Shalaby, Secretary General
 Egyptian National Committee
 Ministry of Public Works and Water Resources
 Kasr El-Einy Str.
 Cairo, Egypt

The response includes comments on the outline, specifically suggesting adding a section on the capability of filter and drain systems to maintain the design phreatic line within the drainage system and not within the downstream shell such that seepage exits on the downstream slope. Note that Cedergren's response emphasizes this point also.

Filter design and construction criteria evolved as a result of the High Aswan Dam development in the 1960's. Filter design, construction data and drawings illustrating the details of filters for the High Aswan Dam are included in the response.

FINLANDE, COMITÉ NATIONAL

Antti Leskela
PO Box 112
SF-01601 Vantaa
Finlande

Les normes norvégiennes sont généralement utilisées en Finlande. Lorsqu'un matériau morainique est utilisé, seule la fraction inférieure à 20 mm est considérée pour la conception du filtre adjacent. La grosseur maximale des particules est limitée à 60-100 mm. Une section type des barrages en terre de Kurkiaska est présentée avec les courbes granulométriques du noyau de moraine et du filtre.

Un cas pratique est présenté. Il porte sur le phénomène de gel/dégel du filtre en crête d'un barrage, produisant une dégradation du matériau et le lessivage du matériau du noyau à travers le filtre. Ce phénomène s'est développé au cours d'une longue période et n'a affecté que les deux mètres supérieurs de l'ouvrage.

La réponse présente aussi les critères suédois de filtre (page 1, en suédois) et indique quelques pratiques utilisées pour assurer l'intégrité des ouvrages en remblai construits en milieu nordique.

FRANCE, COMITÉ NATIONAL

G. Douillet, Secrétaire-Trésorier
Savoie-Technolac
73373 Le Bourget-du-Lac Cedex
France

Le Comité National répond par une lettre contenant la liste des barrages suivants :

- 1) Pla de Soulcem
- 2) Grand'Maison
- 3) Verney
- 4) Vieux-Pré

Sur chacun de ces barrages, des difficultés ont été rencontrées pour satisfaire aux spécifications granulométriques des filtres; des changements ont dû être apportés durant la construction, selon les conditions particulières rencontrées. Ces quatre barrages sont maintenant en service sans qu'aucune difficulté n'ait été signalée.

ALLEMAGNE, COMITÉ NATIONAL

J. Debelius
Nationales Komitee fur Grosse Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland
Postfach 1139
Graf-Recke-Strasse 84
4000 Dusseldorf 1
Allemagne

La réponse inclut une lettre du Professeur Josef Brauns et une du Professeur Th. Strobl.

FINLAND, NATIONAL COMMITTEE

Antti Leskela
PO Box 112
SF-01601 Vantaa
Finland

The Norwegian regulations are commonly used in Finland. When a moraine base material is used, only that part which is finer than 20 mm is considered in the design of the adjacent filter. The maximum grain size of filters is limited to 60-100 mm. A typical cross-section of the Kurkiaska earth dams is presented with gradation curves for the moraine core and the filter.

A case history is presented that involved freeze/thaw of the filter at the crest of the dam, subsequent degradation, and washing of material from the core through the filter. The above occurred over decades and only involved the top 2 meters of the dam.

The response also presents the Swedish filter criteria (1 page, in Swedish) and lists several techniques to maintain embankment integrity in cold climates.

FRANCE, NATIONAL COMMITTEE

G. Douillet, Secretary/Treasurer
Savoie-Technolac
73373 Le Bourget-du-Lac Cedex
France

The French National Committee, through its Sec./Treasurer, G. Douillet, responded with a letter listing the following dams :

- 1) Pla de Soulcem Dam.
- 2) Grand'Maison Dam.
- 3) Verney Dam, and
- 4) Vieux-Pré Dam.

At each of these dams difficulty was experienced in meeting the specified gradation of the filters; modifications were made during construction, as required. These four dams are now in operation with no difficulties.

GERMANY, NATIONAL COMMITTEE

J. Debelius
Nationales Komitee fur Grosse Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland
Postfach 1139
Graf-Recke-Strasse 84
4000 Dusseldorf 1
Germany

The response includes one letter from Prof. Josef Brauns and one from Prof. Th. Strobl.

Une liste de références est donnée dans la lettre du Prof. Brauns. Notons que cette réponse doit être lue avec celle rapportée sous le nom de Josef Brauns.

Le Prof. Strobl discute de la conception des filtres et de leur épaisseur, ainsi que cela a été appliqué au barrage Brombach. Une largeur minimale de 3 m a été adoptée en vue d'éviter une reprise manuelle du matériau. La réponse rappelle aussi que le filtre doit être compacté de façon modérée parce qu'un compactage excessif en réduit la perméabilité.

JAPON, COMITÉ NATIONAL

Kazuto Nakazawa
Uchisaiwai Building
4-2, Uchisaiwai-cho 1-chome
Chiyoda-ku, Tokyo 100
Japon

La réponse souligne que le phénomène de voûte qui se développe entre le noyau et le filtre, résultant de la compressibilité différentielle, doit être examiné. Cette remarque a aussi été faite par de Mello. La notion de « filtre critique », présentée par Sherard, est généralement prise en compte au Japon pour la conception des filtres.

Une seconde réponse présente des commentaires sur les grandes lignes du rapport, des données sur les critères de conception (Terzaghi, COE et USBR) ainsi que des courbes granulométriques de filtre spécifiées pour plusieurs barrages au Japon. Les granulométries du matériau de base et du filtre correspondant sont aussi données.

CORÉE, COMITÉ NATIONAL

J. W. Lee, Secrétaire, KNCOLD
9th Floor, Government Pension Management Building
24-3 Yeouido-Dong, Yeongdeungpo-Gu
Séoul 150, Corée

Les zones d'emprunt de sable et de gravier, disponibles à proximité du site des barrages, sont utilisées pour les filtres. La qualité des matériaux est évaluée en se basant sur le poids volumique, la teneur en eau, la résistance au cisaillement et la granulométrie. Les paramètres du matériau de plusieurs barrages sont donnés. Des sections-types d'ouvrages sont aussi présentées ainsi que les courbes granulométriques spécifiées pour le barrage Soyang gang.

MAROC, COMITÉ NATIONAL

M. Bzioui, Secrétaire MCOLD
Administration de l'Hydraulique
Rue Hassan Benchekroun-Agdal - Rabat
Maroc

La réponse suggère que les aspects économiques des filtres soient discutés, à savoir que la production d'un filtre de grande qualité est une opération coûteuse. Le coût de production des filtres et des drains devrait être comparé avec celui des autres matériaux de l'ouvrage en remblai (voir la réponse de l'Australie à ce sujet).

A list of references is included with Prof. Brauns submittal. Note that this response is to be read with the submittal listed under Josef Brauns.

Prof. Strobl discusses filter design and thickness as applied to the Brombach Dam. A minimal filter width of 3 m was chosen to avoid hand working of the material. The response also warns that the filter should be moderately compacted because excessive compaction can reduce the permeability.

JAPAN, NATIONAL COMMITTEE

Kazuto Nakazawa
Uchisaiwai Building
4-2, Uchisaiwai-cho 1-chome
Chiyoda-ku, Tokyo 100
Japan

The reply suggests that arching of the core caused by differential compressibility between core and filter should be discussed. Note that this point is also emphasized by de Mello. The concept of the "critical filter" as presented by Sherard is currently used to design filters in Japan.

A second submittal presents comments on the outline, data on filter criteria (Terzaghi, COE and USBR) and examples of filter gradations for several dams in Japan. Base material with accompanying filter gradation curves are also presented.

KOREA, NATIONAL COMMITTEE

J. W. Lee, Secretary, KNCOLD
9th Floor, Government Pension Management Building
24-3 Yeouido-Dong, Yeongdeungpo-Gu
Seoul 150, Korea

Sands and gravels obtained from nearby borrow sources are used for filters. Materials are evaluated by considering unit weight, water content, shear strength and gradation. Material parameters are presented for several dams. Typical cross-sections of several dams are included. Gradation curves for the Soyang gang dam are included in the submittal.

MOROCCO, NATIONAL COMMITTEE

M. Bzioui, Secretary of MCOLD
Administration de L'Hydraulique
Rue Hassan Benchekroun-Agdal-Rabat
Morocco

The response suggests that economic aspects of filters be included, i.e., processed high quality filter material can be expensive. Costs of filter/drain material should be compared with other embankment materials. See the submittal from Australia for further comment on this aspect.

La pierre calcaire contenant 5 % de fines est couramment utilisée comme matériau de filtre. Antérieurement, les spécifications techniques limitaient le pourcentage de fines à 3 %. Cette spécification avait été jugée trop contraignante du point de vue production.

PAYS-BAS, COMITÉ NATIONAL

J. van Duivendijk
c/o Harkoning
Berg En Dalseweg 81
Postbox 151, 6500 Ad Nijmegen
Pays-Bas

Le Comité National des Pays-Bas a soumis les documents suivants portant sur les essais, les critères et la stabilité interne des filtres :

- 1) Méthode de calcul du tassement de filtres semi-stables.
- 2) Critères de conception des filtres granulaires.
- 3) Effets de la nappe phréatique en géotechnique.
- 4) Critères hydrauliques des filtres appliqués aux talus.
- 5) Stabilité interne des matériaux miniers.
- 6) Nouveaux critères pour filtres granulaires et géotextiles sous un revêtement.

Une bonne partie de la réponse porte sur le problème de la stabilité des sables fins sans cohésion, placés dans le corps d'une digue, pour les empêcher de migrer à travers le matériau de protection sous l'action des vagues. De nombreux essais de filtre ont permis d'élaborer des critères particuliers pour la conception des matériaux de recouvrement soumis à l'action des vagues.

Les rapports techniques suivants ont aussi été présentés :

- Baker, K. J., 1987, « Hydraulic Filter Criteria for Banks », 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Irlande.
- Bakker, K. J., Breteler, M. K., et den Adel, H., 1990, « New Criteria for Granular Filters and Geotextile Filters under Revetments », International Conference on Coast Engineering, Delft.
- den Adel, H., Bakker, K. J. et Schaminee, P., 1987, « A Transport Model for Filtration », 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin.
- den Adel, H., Bakker, K. J. et Breterler, M. K., 1988, « Internal Stability of Minese-tone », SOWAS, Delft.
- de Graauw, A., van der Meulen, T., and van der Does de Bye, M., 1983, « Design Criteria for Granular Filters », Delft Hydraulics Laboratory, Pub. n° 287, janvier.

Crushed limestone with fines content of 5 % is a commonly used filter material. Previously, a specification of 3 % fines was used, but this was found to be too difficult to produce.

NETHERLANDS, NATIONAL COMMITTEE

J. van Duivendijk
c/o Haskoning
Berg En Dalseweg 81
Postbox 151, 6500 Ad Nijmegen
Pays-Bas

The Netherlands national committee submitted the following documents pertaining to filter testing, criteria and internal stability :

- 1) A computation method for the settlement of semi-stable filters.
- 2) Design criteria for granular filters.
- 3) Groundwater effects in geotechnical engineering.
- 4) Hydraulic filter criteria for banks.
- 5) Internal stability of minestone.
- 6) New criteria for granular filters and geotextile filters under revetments.

Much of the response is directed toward the problem of protecting fine cohesionless sand as placed in the body of a dike from migrating or piping through the cover material, a result that might be caused by the action of waves. Extensive filter tests have led to specific criteria for the design of cover material under these conditions.

The following technical papers were included with the submittal :

- Bakker, K. J., 1987, "Hydraulic Filter Criteria for Banks", 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland.
- Bakker, K. J., Breteler, M. K., and den Adel, H., 1990, "New Criteria for Granular Filters and Geotextile Filters under Revetments", International Conference on Coast Engineering, Delft.
- den Adel, H., Bakker, K. J., and Schaminee, P., 1987, "A Transport Model for Filtration", 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin.
- den Adel, H., Bakker, K. J., and Breterler, M. K., 1988, "Internal Stability of Minestone", SOWAS, Delft.
- de Graauw, A., van der Meulen, T., and van der Does de Bye, M., 1983, "Design Criteria for Granular Filters", Delft Hydraulics Laboratory, Pub. No. 287, January.

NOUVELLE-ZÉLANDE, COMITÉ NATIONAL
Murray Gillon, Convener, NZSOLD Committee on
Materials for Fill Dams
Molesworth House, 101 Molesworth Street
PO Box 12241
Wellington, Nouvelle-Zélande

La conception du filtre doit tenir compte de la sismicité de la région. Si une faille potentiellement active se trouve au droit du filtre, une zone plus large que la normale devra être incorporée à l'ouvrage de sorte que la stabilité du filtre et la protection contre l'infiltration soient assurées dans les cas de tremblement de terre. Suite aux tremblements de terre, des déformations excessives peuvent être causées par des déplacements le long de la faille ou par la rupture de la pente du talus.

La réponse rappelle l'importance des filtres de sable :

« Les fissures dans le barrage Matahina, suite au remplissage de la retenue, ont été colmatées par les particules du filtre amont pénétrant dans les fissures. » Sheppard y fait référence comme étant une possibilité (p. 311, Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume), ce qui est confirmé par Gillon et Newton (*Abutment Repairs at the Matahina Dam*, ICOLD Proceedings, Q. 66, R. 50, p. 921).

NORVÈGE, COMITÉ NATIONAL
Kjell Molkersrod, Secrétaire, NNCOLD
NVE-PO Box 5091
Majorstua N-0301
Oslo 3, Norvège

Les critères de conception des filtres et les spécifications de construction sont présentés dans : « The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams ».

Le chapitre I du document présente la réglementation, le chapitre II présente les règles. Le Tableau 9.3 du chapitre II donne les critères de filtre, qui sont généralement conformes à la pratique du Corps des Ingénieurs des États-Unis. Lorsque la moraine est utilisée comme matériau de base, seule la fraction inférieure à 60 mm est considérée pour la conception du filtre requis. Les critères de filtre sont donnés pour les matériaux de base à granulométrie étroite ($C_u < 1,5$) et ceux à granulométrie étalée ($C_u > 4$).

Les spécifications générales pour la conception et la construction sont données dans le chapitre II.

Voir la réponse de Hoeg pour d'autres informations sur la pratique norvégienne.

NEW ZEALAND, NATIONAL COMMITTEE
Murray Gillon, Convener, NZSOLD Committee on
Materials for Fill Dams
Molesworth House, 101 Molesworth Street
PO Box 12241
Wellington, New Zealand

The design filter width must consider the seismic environment. If a potentially active fault crosses the filter, a wider than normal filter zone should be constructed so that filter integrity and leakage protection is maintained after the earthquake event. Displacements could result from either fault rupture or from slope failure caused by ground shaking.

The response states the importance of sand filters :

“ Cracks in the Matahina Dam following lake filling were sealed by upstream filter material entering the cracks.” This is referred to by Sherard as a possibility (p. 311, Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume) and is confirmed by Gillon and Newton (*Abutment Repairs at the Matahina Dam*, ICOLD Proceedings, Q. 66, R. 50, p. 921).

NORWAY, NATIONAL COMMITTEE
Kjell Molkersrod, Secretary, NNCOLD
NVE-PO Box 5091
Majorstua N-0301
Oslo 3, Norway

Filter design criteria and construction requirements are presented in “ The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams. ”

Part I presents “ Regulation ”; Part II presents “ Rules and Regulations ”. Table 9.3, Part II, presents filter criteria, which is principally in accordance with the US COE practice. When moraine is used as the base material, only that part of the material that passes a 60 mm sieve is considered for design of the adjacent filter. Filter criteria are presented for both narrowly graded ($C_u < 1.5$) and broadly-graded ($C_u > 4$) base materials.

General requirements for the design and construction of embankment dams are presented in Part II.

See the response by Hoeg for further discussion of Norwegian practice.

RUSSIE, COMITÉ NATIONAL

Vadim G. Radchenko, Vice-Président
ICOLD Committee on Materials for Fill Dam
B.E. Vedeneev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering
21, Gzhatskaya Street
195220, St. Petersburg
Russie

La réponse présente les « Principes de base de la technique des filtres inversés à l'interface avec des matériaux cohérents et pulvérulents », tels qu'utilisés en Russie. Le document contient ce qui suit :

Considérations générales.

Conception de base dans la technique des filtres inversés.

Technique des filtres inversés pour la protection des matériaux pulvérulents.

Technique des filtres inversés pour la protection des matériaux cohérents.

Des références et des figures sont jointes au document. Un résumé de ce document est donné en Annexe C.

AFRIQUE DU SUD, COMITÉ NATIONAL

Heinrich Elges
PO Box 3404
Prétoira, 0001
République d'Afrique du Sud

La réponse porte sur le contenu du rapport et sur des sujets à ajouter. Les commentaires particuliers sont :

De façon générale, les règles de conception pour filtres granulaires, telles que proposées par l'*USBR*, sont utilisées par le Département « Water Affairs », alors que celles de Sherard sont suivies pour la conception des filtres dans le cas des silts et des argiles. L'exigence additionnelle porte sur la fraction passant le tamis n° 200 qui doit être inférieure à 5 %, produisant un filtre dans lequel toute fissure ouverte se referme suite à la saturation du milieu.

La réponse propose d'incorporer au rapport les aspects du colmatage des filtres sous l'action des bactéries ou sous l'effet des dépôts chimiques, comme le cas se présente pour les stériles miniers.

Un cas pratique portant sur le barrage Kwaggaskloof est présenté : dans ce cas particulier, un filtre relativement grossier fut placé comme drain-cheminée immédiatement en aval du noyau d'argile à titre de protection contre l'érosion interne et en vue d'augmenter la stabilité de la recharge aval vis-à-vis d'un glissement. Le matériau utilisé n'a pas joué le rôle de filtre vis-à-vis du noyau; de plus, l'argile était dispersive, comme découvert plus tard, de sorte que les réparations suivantes durent être effectuées :

- 1) Injection du drain cheminée,
- 2) Mise en place d'une risberme drainante, et
- 3) Installation d'une série de puits de décompression.

RUSSIA, NATIONAL COMMITTEE

Vadim G. Radchenko, Vice-Chairman
ICOLD Committee on Materials for Fill Dams
B. E. Vedeneev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering
21, Gzhatskaya Street
195220, St. Petersburg
Russia

The submittal presents the “ Basic Principles of Engineering Inverted Filters at the Interface with Cohesive and Non-cohesive Soils ” as practiced in Russia. The document contains the following :

General Considerations

Basic Design Relationships for Engineering Inverted Filters

Engineering Inverted Filters for Protecting Non-Cohesive Soils

Engineering Inverted Filters for Protecting Cohesive Soils

References and figures accompany the submittal. A summary of this submittal is contained in Appendix C.

SOUTH AFRICA, NATIONAL COMMITTEE

Heinrich Elges
PO Box 3404
Pretoria, 0001
Republic of South Africa

The response comments on the bulletin outline and the issues to be included. Specific comments :

Generally, the design rules proposed by the USBR have been used by the Department of Water Affairs for granular filter design, while Sherard's (SCS) proposal is used for designing filters for silts and clays. The additional requirement is made that the filter material shall not have more than 5 % by mass passing the No. 200 sieve. This is required so that the filter will not sustain an open crack upon saturation.

The response suggests that clogging of filters due to biological and/or chemical deposits, such as in some tailings dams, should be included in the bulletin.

A case history involving the Kwaggaskloof dam is presented. In this particular instance a relatively coarse filter was placed as a chimney drain immediately downstream of the clay core of the dam as protection against piping failure and to increase the stability of the downstream zone against sliding. The material did not act as a filter for the clay core; the clay was also later found to be dispersive. Repairs consisted of the following measures :

- 1) Grouting the chimney drain,
- 2) Providing a suitable drained berm, and
- 3) Constructing a series of pressure relief wells.

Des dessins illustrant les mesures prises sont inclus dans la réponse.

Une seconde réponse apporte des commentaires à la première réponse et ajoute des observations se rattachant à des expériences particulières.

Les définitions suivantes sont proposées :

1) **Filtration** : la situation dans laquelle un liquide percole à travers un milieu poreux ou un ensemble de milieux poreux sans changer la stabilité du milieu.

2) **Drainage** : l'évacuation des eaux de percolation du milieu poreux à un débit tel qu'aucune pression interstitielle excessive n'est générée dans ce milieu poreux.

3) **Rupture par érosion interne** : perte inacceptable de matériaux provenant du matériau de base.

Les observations suivantes ont été faites :

« Le filtre vertical (drain-cheminée) à l'aval du noyau devrait se prolonger jusqu'à la crête du remblai ou aussi haut que possible, particulièrement dans le cas d'un noyau silteux ou d'un noyau constitué d'argile dispersive, c'est-à-dire lorsque le matériau du noyau est érodable. Le filtre devrait être recouvert par 300-500 mm de matériaux de protection non érodables en vue de prévenir l'entrée des eaux de ruissellement et d'empêcher l'érosion de surface. Cette mesure devrait empêcher les risques d'érosion interne dans la partie supérieure du remblai dus aux eaux de pluie, particulièrement dans le cas d'argiles dispersives. »

La réponse inclut le cas pratique du barrage Balancing A (ouvrage homogène de 6 m de hauteur et comportant un drain-cheminée se terminant à 1 m sous la crête) où des dommages par érosion interne sous la crête et dans le talus aval ont été observés. La cause de ces dommages fut la fissuration due au retrait par séchage de l'argile dispersive. Les eaux de pluie se sont écoulées par ces fissures jusqu'au talus aval du barrage. A la longue, l'érosion dans les fissures a produit de nombreux petits canaux internes et un ravinement sur le talus aval. De plus, on a observé deux importants conduits d'érosion débutant près du centre de la crête du remblai avec une sortie dans le tiers inférieur du talus aval. Le filtre/drain-cheminée a servi de barrière à la progression de l'érosion interne vers l'aval.

« Le noyau d'un barrage en remblai devrait se prolonger jusqu'à la crête, dont le niveau est suffisamment élevé pour éviter tous risques de déversement, et le matériau de la couche de surface de la crête devrait avoir une résistance à l'érosion aussi grande que possible. La rupture d'un barrage en remblai en Afrique du Sud fut provoquée par l'eau de percolation à travers la couche de fondation de la route de service en crête du barrage.

Un filtre amont destiné à libérer des particules pour remplir des fissures éventuelles du noyau n'est pas adopté pour nos barrages. »

Drawings illustrating the remedial measures are included with the response.

In addition to the above, a second submittal provides review comments on the first draft and adds observations from personal experience.

The following definitions are suggested :

1) **Filtration.** The condition where liquid passes through a porous media or combinations of porous media without disturbing the stability of the media.

2) **Drainage.** The removal of excess water from any porous media at a rate which is sufficiently high to prevent the development of excess pore water pressures in that media.

3) **Piping failure.** The loss of base material to an unacceptable degree.

The following observations are made :

“ The vertical filter (chimney drain) downstream of the core should extend to the top of the embankment or as high as possible especially in the case of a silty core or a core built with dispersive clay, i.e., where the core material is erodible. The filter should be covered by 300-500 mm of non-erodible fill to prevent ingress of surface water and to counter surface erosion. This measure will prevent pipe formation in the upper part of the embankment due to rain water, especially in the case of dispersive clays. ”

The response includes the case history of Balancing Dam A (homogenous dam, 6 m high, with a chimney drain to within 1 m of the crest) which was damaged by tunneling on the crest and downstream slope of the dam. The damage was caused by shrinkage cracking within the dispersive clay fill. Rainfall then found the shrinkage cracks and followed a path to the downstream face of the dam. Ultimately, erosion within the cracks caused numerous small erosion tunnels and gullies on the downstream face. In addition, there were two large erosion tunnels starting near the center of the embankment crest with exits in the lower third of the downstream slope. The chimney filter/drain served as a barrier to the downward progress of the erosion.

“ The core of the embankment should extend to the non-overspill crest of the dam and the crest surface should have as high an erosion resistance as possible. The failure of an embankment dam in South Africa was triggered by water seeping through the base course of a service road along the crest.

An upstream filter to act as a crack filler is not used on our dams. ”

SRI LANKA, COMITÉ NATIONAL
S.H.C. de Silva, Secrétaire SLNCOLD
Irrigation Department
PO Box 1138
Buddhaloka Mawatha
Colombo 7, Sri Lanka

La réponse propose que la stabilité du filtre soit examinée pour des conditions de fracturation hydraulique.

THAÏLANDE, COMITÉ NATIONAL
Kriengsak Bhadrakom, Secrétaire
Thai National Committee on Large Dams
National Energy Administration
Kasatsuk Bridge
Bangkok 10330
Thaïlande

Le mémoire présente les critères de conception et la pratique de construction suivis par EGAT (Electricity Generation Authority of Thailand). Les critères de Terzaghi sont utilisés par EGAT; depuis 1983, la grosseur maximale des particules d'un filtre fin est limitée à 75 mm, 40 % ou plus des particules du matériau devant passer le tamis n° 4 et la fraction passant le tamis n° 200 devant être inférieure à 5 %.

Une méthode pour la détermination de la perméabilité est présentée ainsi que les résultats d'essais sur des matériaux de filtre contenant différents pourcentages de particules inférieures au tamis n° 200.

ZIMBABWE, COMITÉ NATIONAL
T. C. Kabell, Président
Private Bag 7712
Causeway, Zimbabwe

De façon générale, les critères de filtre utilisés sont ceux présentés dans le manuel de Sherard intitulé « Earth and Earth-Rock Dams ». Les spécifications techniques pour les filtres fins et les filtres grossiers sont données dans la réponse.

SRI LANKA, NATIONAL COMMITTEE

S. H. C. de Silva, Secretary, SLNCOLD

Irrigation Department

PO Box 1138

Buddhaloka Mawatha

Colombo 7, Sri Lanka

The reply suggests that the stability of the filter under the condition of hydraulic fracture should be discussed.

THAILAND, NATIONAL COMMITTEE

Kriengsak Bhadrakom, Secretary

Thai National Committee on Large Dams

National Energy Administration

Kasatsuk Bridge

Bangkok 10330

Thailand

The submittal presents the design criteria and construction practices of the Electricity Generation Authority of Thailand (EGAT). Terzaghi criteria is used; after 1983, the maximum size of fine filter material was restricted to 75 mm, 40 % or more passing the no. 4 sieve, and no more than 5 % passing the no. 200 sieve.

A typical setup for measuring permeability and the results of tests on filter material with varying amounts of minus no. 200 material are presented.

ZIMBABWE, NATIONAL COMMITTEE

T. C. Kabell, Chairman

Private Bag 7712

Causeway, Zimbabwe

Typically, the filter criteria used follows that presented in Sherard's text, Earth and Earth-Rock Dams. A typical specification for filters including gradations for both fine and coarse filters is presented in the response.

RÉPONSES D'ORGANISMES

PORTUGAL, LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Pedro Simao Seco Pinto
Principal Research Engineer
Avenida do Brasil, 101
1799 Lisboa Codex
Portugal

La réponse du LNEC porte sur la pratique courante appliquée à la conception des filtres :

1) Pour les petits barrages (hauteur inférieure à 15 m), le matériau filtre doit avoir un $D_{15} = 0,4$ mm et un coefficient d'uniformité inférieur à 20.

2) Pour les grands barrages ($15 \text{ m} < H < 40 \text{ m}$), les gradients de sortie sont calculés suivant la procédure proposée par Zaslavski et Kassif, 1965; le D_{15} du matériau est alors défini en suivant la procédure proposée par Wolski et al. en 1970.

3) Pour les plus grands barrages ($H > 40 \text{ m}$), le matériau filtre est analysé en laboratoire en suivant la procédure proposée par Seco e Pinto et Santana, 1989.

La stabilité vis-à-vis de l'érosion interne et la perméabilité sont étudiées en laboratoire en suivant les procédures décrites par Seco e Pinto et Santana, 1989. La stabilité interne est analysée suivant les critères de Sherard, 1981, et la méthode proposée par Kenney et Lau, 1985.

Les spécifications de construction comportent la mise en place du filtre en couches horizontales de 30 cm d'épaisseur, compactées par deux ou trois passes d'un rouleau lisse vibrant de 10 tonnes. En vue d'éviter la contamination, le filtre est mis en place à 0,5 m au-dessus du niveau du matériau adjacent. Des essais granulométriques et de perméabilité sont réalisés avant et après mise en place selon une fréquence de l'ordre d'un essai par 5 000 m³ de matériau.

Afin de minimiser la ségrégation, les règles suivantes sont suivies :

$D_{\text{max}} < 50$ à 75 mm et $< d_{50}$ du matériau de base

Coefficient d'uniformité $D_{60}/D_{10} < 20$.

Dans le cas d'un barrage au Portugal, de 55 m de hauteur (nom du barrage non fourni), des essais de perméabilité ont été effectués afin de déterminer le pourcentage acceptable de fines dans le filtre; un pourcentage jusqu'à 7 % est acceptable, pourvu que les essais indiquent un coefficient de perméabilité k supérieur à 10^{-3} cm/s.

Les principales références soumises sont :

Wolski, W. et al., 1970, « Protection against Piping of dam cores of Flysch Origin Cohesive Soils », 10th Congress on Large Dams, Vol. I, pp. 575-585, Montréal.

RESPONSES FROM AGENCIES

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, PORTUGAL

Pedro Simao Seco Pinto
Principal Research Engineer
Avenida do Brasil, 101
1799 Lisboa Codex
Portugal

The response from the Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC) presents their current criteria for filter design :

1) For small earth dams (height less than 15 m), a filter material with $D_{15} = 0.4$ mm and a uniformity coefficient less than 20.

2) For large dams ($15 \text{ m} < H < 40 \text{ m}$), the exit gradient is estimated in accordance with the procedure defined by Zaslavski and Kassif, 1965; the D_{15} of the material is then defined by the procedure proposed by Wolski, et al. 1970.

3) For large dams ($H > 40 \text{ m}$), the filter material is evaluated by laboratory tests following the procedures described by Seco e Pinto and Santana, 1989.

Piping or stability and permeability is studied in the laboratory using procedures described by Seco e Pinto and Santana, 1989. Internal stability is analyzed using the internal stability ratio as suggested by Sherard, 1981, and by the procedure suggested by Kenney and Lau, 1985.

Construction control includes placement of filter materials in horizontal lifts, 30 cm thick, and compaction by two to three passes of a 10 ton vibratory smooth-drum roller. To avoid contamination, filter materials are placed to a level of 0.5 m ahead of adjacent embankment material. Gradation and permeability tests are performed both before and after placement at a frequency of about one test per 5 000 m³.

To minimize the effects of segregation, the following controls are followed :

$D_{\text{max.}} < 50$ to 75 mm and $< d_{50}$ of the base

Uniformity coefficient, $D_{60}/D_{10} < 20$.

For a 55 m high dam in Portugal (name of dam not provided), permeability tests were performed to determine the allowable percentage of fines for the filter; up to 7 % were allowed, provided the tests indicated that $k_{\text{min}} = 10^{-3}$ cm/s = 10^{-5} m/s.

Key references supporting the submittal are :

Wolski, W. et al., 1970, " Protection against Piping of dam cores of Flysch Origin Cohesive Soils ", 10th Congress On Large Dams, Vol. I, pp. 575-585, Montreal.

Zaslavski, D., et Kassif, G., 1965, « Theoretical Formulation of Piping Mechanism in Cohesive Soils », *Geotechnique*, septembre, 1965.

Seco e Pinto, P. S.; et Santana, T., 1989, « Filters for Clay Cores of Embankment Dams », 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro.

Il est à noter que cette réponse doit être lue avec celle reçue de E. Maranhã das Noves, Directeur du Département Géotechnique du LNEC.

AUSTRALIE, NEW SOUTH WALES

P. R. Mackenzie, Manager
Water Supply and Sewerage
New South Wales Public Works Department
Dams Section
Level 5, 164-174 Liverpool Rd.
Ashfield, NSW 2131
Australie

Les critères de filtre adoptés par la Division des Travaux Publics sont ceux de Terzaghi quant à la granulométrie des filtres. La granulométrie des sables et celle des graviers correspondent généralement à celles des granulats à béton fins et grossiers respectivement. Les matériaux sont lavés et tamisés à l'usine. Des filtres minces sont généralement utilisés dans les petits barrages pour approvisionnement urbain en eau afin de diminuer les coûts. Suite à des problèmes de fuites d'eau dans des barrages homogènes, la Division des Travaux Publics utilise systématiquement un drain-cheminée ainsi qu'un tapis drainant horizontal.

Le matériau filtre doit être constitué de particules de sol ou de pierre concassée sans cohésion, satisfaisant aux spécifications techniques des granulats à béton, avec une teneur en fines égale ou inférieure à 5 % (tamis n° 200). Les filtres sont compactés en couches de 0,3 à 0,5 m à une masse volumique ne dépassant pas 70 % de l'indice de densité relative. Des dessins et spécifications types ont été fournis afin d'illustrer la pratique.

Au barrage Ben Boyd, construit avec un drain-cheminée presque vertical et un tapis drainant constitué d'une couche de gravier intercalée entre deux couches de sable, de nombreuses fuites d'eau ont été observées le long des appuis et au pied aval de l'ouvrage. Des travaux de reconnaissance ont permis de conclure que les matériaux du filtre avaient une perméabilité beaucoup plus faible que celle prévue par les concepteurs, c'est-à-dire que la teneur en fines dans les couches de sable et dans celle du drain de gravier était plus grande que prévu. Le tapis drainant multicouches n'avait pas réussi à dissiper la pression générée par les eaux de percolation dans la fondation. Les réparations ont consisté à mesurer les débits de fuite et à excaver une partie du pied aval jusqu'au rocher, à bien nettoyer ce dernier, à mettre en place un nouveau drain de perméabilité adéquate et à construire une petite risberme stabilisatrice. Ces mesures ont permis de rabattre suffisamment les sous-pressions au pied aval du barrage. Six piézomètres ont aussi été installés à des endroits critiques dans le tapis drainant afin de mesurer les gradients hydrauliques relativement élevés existant à l'amont immédiat du nouveau filtre et de la risberme.

Zaslavski, D., and Kassif, G., 1965, "Theoretical Formulation of Piping Mechanism in Cohesive Soils", *Geotechnique*, September, 1965.

Seco e Pinto, P. S., and Santana, T., 1989, "Filters for Clay Cores of Embankment Dams", 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro.

Note that this response should be read with that received from E. Maranhã das Neves, Head, Geotechnique Department, LNEC.

NEW SOUTH WALES, AUSTRALIA

P. R. Mackenzie, Manager
Water Supply and Sewerage
New South Wales Public Works Department
Dams Section
Level 5, 164-174 Liverpool Rd.
Ashfield, NSW 2131
Australia

Design for filters within Public Works, New South Wales, has followed the Terzaghi criteria for filter gradings. Sands and gravels have complied generally with fine and coarse aggregate respectively for concrete. Materials are generally washed and graded aggregates from established commercial plants. For small urban supply dams relatively thin filters have been used to keep costs low. Following some leakage problems in homogeneous dams, the Public Works Department has consistently used a chimney filter along with the horizontal drainage blanket.

Filter materials consist of cohesionless mineral or rock fragments, which meet the quality specifications for concrete aggregate. No more than 5 % by weight of the filter is allowed to pass the no. 200 sieve. Filters are compacted in layers of 0.3-0.5 m to a density of no less than 70 % relative density. Typical drawings and specifications are enclosed with the submittal to illustrate the use of granular filters.

Ben Boyd Dam, constructed with a near vertical chimney filter and a sand/gravel/sand sandwich type drainage blanket, developed a number of seeps in the abutment and in the toe of the dam. Investigations concluded that the filter materials had much lower permeabilities than the designers had intended, i.e., the fines content within the sand filter and within the gravel drain were higher than intended. The blanket filter/drain system was not effectively relieving foundation seepage pressures. Remedial treatment included the removal of all materials between the partially excavated toe of the dam and the seepage measuring weir, thorough clean-up of the foundation rock, placement of new filter material with adequate permeability and placement of a small stabilizing berm. The treatment was effective in lowering the foundation pressures near the toe of the dam. Six additional piezometers were placed in critical locations within the filter to monitor the high gradient immediately upstream of the new filter and berm.

Au barrage Ben Boyd, le problème rencontré résultait donc d'une trop faible perméabilité du filtre. Même avec un filtre de perméabilité adéquate, la Division a jugé nécessaire, pour les barrages zonés, d'épaissir les filtres dans les zones où il y a concentration de débit, particulièrement au fond de la vallée. Au Barrage Deep Creek, ouvrage en terre de 30 m de hauteur, l'épaisseur du tapis drainant fut portée à 1,5 m sur une distance de 15 m dans la partie basse de la vallée. La couche drainante centrale de gravier est protégée de part et d'autre par des couches de filtre de 30 cm d'épaisseur.

La capacité de rétention d'un filtre devrait être étudiée en laboratoire s'il y a des doutes sur cette capacité pour des conditions particulières, par exemple : lorsqu'une argile fine et dispersive doit être protégée, ou bien lorsqu'un filtre est constitué de particules allongées (conduisant à un indice de vides élevé), ou encore lorsque le filtre s'appuie sur une surface lisse de béton. Si les sources d'approvisionnement sont de qualité marginale, la capacité de rétention du filtre doit être étudiée sur des matériaux représentatifs. La référence suivante est citée :

Eagles, J. H., 1978, « Dispersive Soils : Testing of a Sydney Basin Clay », *ANCOLD Bulletin no. 51*, juillet, pp. 25-35.

PAKISTAN, MINISTRY OF WATER AND POWER

Latif Ahmad, Deputy Engineering Adviser
Office of the Chief Engineering Adviser
Ministry of Water and Power
16-D (East) Blue Area
Islamabad, Pakistan

La réponse a été préparée par Abdul Khaliq Khan, Ingénieur en Chef, Division de la Sécurité des Barrages, Water and Power Development Authority, Pakistan.

L'évolution des critères de filtre s'inspire des travaux effectués par des chercheurs européens, américains et canadiens. Dans le cas du barrage de Tabela, un nombre important d'essais ont été réalisés sur des échantillons de 16 po en vue de déterminer sous quelles conditions le matériau du noyau commence à se déstabiliser et à migrer dans le matériau de transition, et sous quelles conditions le colmatage se produit. Les détails de ces essais ainsi que les détails sur la formation d'un cône d'affaissement au Barrage Auxiliaire n° 1 sont présentés dans la réponse.

Deux exemples sont aussi rapportés :

1) Les sédiments qui s'étaient déposés dans le réservoir Khanpur ont été transportés à travers des chemins préférentiels existant dans les calcaires sous-jacents jusque dans les puits de décompression construits sous le pied aval de l'ouvrage en remblai. Le matériau filtre ceinturant le puits n'a pu prévenir la migration des sédiments et la sortie d'eau est devenue fortement boueuse.

2) Le matériau filtre concassé utilisé pour des drains horizontaux, construits sur un terrain imbibé d'eau, n'a pu arrêter la migration du sol de fondation bien que le fuseau granulométrique du filtre spécifié ait été établi à la suite des résultats concluants d'essais en laboratoire.

At Ben Boyd Dam, the problems resulted from too low permeability of the filter. Even with adequate permeability, the Department has found a need, in zoned earth dams, to thicken the filters where flow concentrates in the bottom of the valley. At the Deep Creek Dam, a 30 m high earthfill dam, the drain layer was thickened to 1.5 m for a width of 15 m across the valley bottom. The drain layer is protected by 30 cm layers of fine filter.

Direct testing of filter retention capability is an approach that can be useful wherever there is doubt concerning whether there is effective retention; for example, where fine dispersive clays are to be retained, or where the filter media are angular/elongated (leading to high void ratios), or where filters abut smooth concrete surfaces. If material sources are marginal, retention capability should be checked by direct testing. The following reference is cited :

Eagles, J. H., 1978, " Dispersive Soils : Testing of a Sydney Basin Clay ", *ANCOLD Bulletin No. 51*, July, pp. 25-35.

PAKISTAN, MINISTRY OF WATER AND POWER

Latif Ahmad, Deputy Engineering Adviser
Office of the Chief Engineering Adviser
Ministry of Water and Power
16-D (East) Blue Area
Islamabad, Pakistan

The response was prepared by Abdul Khaliq Khan, Chief Engineer, Dams Safety Organization, Water and Power Development Authority, Pakistan.

The evolution of filter design follows the work of European, American and Canadian researchers. At Tarbela Dam, a large number of tests were carried out on 16 inch diameter specimens to determine under what conditions the core material begins to migrate into the transition material and under what conditions healing takes place. Details of these tests and of the formation of a sinkhole in Auxiliary Dam No. 1 are presented.

Two case histories are presented :

1) The sediment depositing in the Khanpur reservoir were transported through preferred paths in the limestone and into relief wells installed at the downstream toe of the embankment dam. The filter material surrounding the relief well did not check the migrating sediments thus yielding highly turbid flows.

2) Crushed filter material in horizontal drains (for waterlogged land) could not stop migration of soil although tests confirmed the specified grading limits.

La réponse propose que plusieurs aspects soient rappelés dans le bulletin, en particulier les techniques de forage à travers le remblai des barrages sans causer de dommages.

Plusieurs rapports ou extraits de rapports sont aussi inclus :

- 1) La formation d'un cône d'affaissement au niveau 1 525 du Barrage Auxiliaire n° 1 de l'aménagement de Tarbela, octobre 1981.
- 2) L'essai d'érosion interne au Laboratoire de chantier, aménagement de Tarbela, 1989.
- 3) Les travaux de reconnaissances au Barrage Auxiliaire n° 1, aménagement de Tarbela, janvier 1979.
- 4) Le traitement du cône d'affaissement réalisé en 1979 au Barrage Auxiliaire n° 1, aménagement de Tarbela, novembre 1979.
- 5) Rapport sur le Barrage Auxiliaire n° 1 – 1980, Premier rapport annuel complémentaire, octobre 1980.
- 6) Rapport sur le Barrage Auxiliaire n° 1 – 1981, Second rapport annuel complémentaire, octobre 1981.
- 7) Altaf-ur-Rahman, « Drilling through cores of dams », troisième conférence nationale, Société Nationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, décembre 1990.
- 8) Izharul, H., Khaliq, A., « Prefabricated Sand Filter Drains used at Tarbela Dam ».
- 9) Deuxième rapport d'inspection périodique, barrage Khanpur, février 1988.

Plusieurs de ces rapports contiennent des informations sur les phénomènes de renard et de cône d'affaissement qui ont été observés au Barrage Auxiliaire n° 1 de l'aménagement de Tarbela.

ÉTATS-UNIS, TENNESSEE VALLEY AUTHORITY

H. C. Kolbb, Manager
Fossil and Hydro Engineering
Tennessee Valley Authority
4N 52A Blue Ridge Place
Chattanooga, Tennessee 37402
USA

TVA présente leurs principes de base pour la conception des filtres et drains granulaires avec des exemples. Des extraits du document « Design of TVA Projects – Technical Report n° 24 – Vol. 1, Civil and Structural Design » décrivent les principes de conception, c'est-à-dire les critères de Terzaghi $D_{15}/d_{85} < 5$ et $D_{15}/d_{15} > 5$.

Pour le barrage Columbia, le matériau de drain fin (filtre pour un matériau de base à granulométrie fine) devait être conforme à l'ASTM C-33 pour un sable à béton, à la fois des points de vue qualité et granulométrie, excepté que pas plus de 5 % en poids des particules ne devait passer le tamis n° 100 et pas plus de 2 % en

The response suggests several items that should be considered for inclusion in the bulletin outline; specifically, the techniques for drilling through embankment dams without causing damage should be included.

Several reports or excerpts of reports were also included :

- 1) Sinkhole Formation at El. 1525, Auxiliary Dam No.1, Tarbela Dam Project, October, 1981.
- 2) Piping Test at Site Laboratory, Tarbela Dam Project, 1989.
- 3) Exploratory Works, Auxiliary Dam No. 1, Tarbela Dam Project, January, 1979.
- 4) Sinkhole Treatment in 1979, Auxiliary Dam No. 1, Tarbela Dam Project, November, 1979.
- 5) Report on Auxiliary Dam No. 1 – 1980, First Annual Supplement, October, 1980.
- 6) Report on Auxiliary Dam No. 1 – 1981, Second Annual Supplement, October, 1981.
- 7) Altaf-ur-Rahman, Drilling Through Cores of Dams, Third National Conference, National Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lahore, December, 1990.
- 8) Izharul, H., Khaliq, A., Prefabricated Sand Filter Drains used at Tarbela Dam.
- 9) Report on Second Periodic Inspection, Khanpur Dam Project, February, 1988.

Several of the above reports discuss the piping and sinkhole development that occurred at Auxiliary Dam No. 1, Tarbela Dam Project.

TENNESSEE VALLEY AUTHORITY

H. C. Kolb, Manager
Fossil and Hydro Engineering
Tennessee Valley Authority
4N 52A Blue Ridge Place
Chattanooga, Tennessee 37402
USA

TVA presents the basis for design of granular filters and drains along with examples. Excerpts from “ Design of TVA Projects – Technical Report No. 24 – Vol. 1, Civil and Structural Design ” present the basis for design, i.e., Terzaghi criteria, $D_{15}/d_{85} < 5$ and $D_{15}/d_{15} > 5$.

For the Columbia Dam, fine drain material (filter for fine-grained base) was specified to conform to ASTM C-33 for concrete sand for both quality and gradation except that not more than 5 % by weight shall pass the No. 100 sieve and not more than 2 % by weight shall pass the No. 200 sieve. Coarse drain material

poids le tamis n° 200. Le matériau de drain grossier avait une granulométrie uniforme entre 2 pouces et le tamis n° 20. Les enveloppes granulométriques et la qualité du matériau filtre sous le riprap sont aussi présentées. Le projet est un bon exemple de l'utilisation d'un drain-cheminée avec un matériau de drain fin conduisant à une série de drains en forme d'antenne sous la recharge aval. Ces drains consistent en un matériau plus grossier au centre entouré d'un matériau plus fin. L'envoi contenait aussi des spécifications techniques pour la construction d'ouvrages en terre, filtres et drains.

Les spécifications techniques pour les filtres et drains de l'aménagement de transfert d'énergie par pompage de Raccoon Mountain sont aussi disponibles.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION

Francis G. Mclean, Chief
Geotechnical Engineering and Embankment Dams Branch
PO Box 25007
Building 67, Denver Federal Center
Denver, Colorado, 80225-0007
USA

Une liste de références de même qu'une description complète de l'évolution de la conception des filtres au Bureau of Reclamation sont comprises dans la réponse. Les critères utilisés couramment par l'USBR pour la conception des filtres et des tapis de drainage des barrages en remblai se trouvent dans le document « Design Standards n° 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters, May 13, 1987 ». Le choix de l'enveloppe granulométrique des filtres est basé sur les critères traditionnels de Terzaghi et les essais de laboratoire effectués par Sherard et l'US Soil Conservation Service. On y décrit les critères courants de l'USBR pour ce qui est de l'érosion interne, de la perméabilité, de la capacité d'écoulement, de la stabilité interne et de l'autocolmatage. On y souligne les spécifications de construction et on fait des commentaires sur les différences entre la conception et la réalisation.

Plusieurs exemples sont donnés, incluant :

- 1) Le remplacement du drain de pied au barrage Crab Orchard.
- 2) La rupture de la protection du talus au barrage Kingsley, conçue sans filtre adéquat.
- 3) L'utilisation de filtres au barrage Calamus (incluant les moyens de prévention pour contrôler les fortes percolations prévues dans la fondation).

Le texte contient des commentaires sur le chapitre « points de vue controversés » du bulletin, tels que la conception des filtres pour un matériau de noyau à granulométrie étalée, l'acceptation de la position de Sherard sur le rôle critique du filtre dans la protection du noyau, et la valeur potentielle d'un filtre de sable au sommet du barrage en amont du noyau pour fermer les fissures.

was uniformly graded between 2 inch and the No. 20 sieve. Gradations and quality of filter material below riprap are also presented. The project is a good example of the use of a chimney drain with fine drain material leading to a series of finger drains beneath the downstream shell. These drains consist of coarse drain surrounded by fine drain material. Copies of construction specifications for earthwork, filters and drains are included in the submittal.

Also available are the filter and drain specifications for the embankment dams at the Raccoon Mountain pumped storage project.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION

Francis G. Mclean, Chief
Geotechnical Engineering and Embankment Dams Branch
PO Box 25007
Building 67, Denver Federal Center
Denver, Colorado, 80225-0007
USA

A complete description of the evolution of filter design within the United States Bureau of Reclamation is presented along with a reference list. Current USBR criteria for design of filters and drainage blankets for embankment dams is found in "Design Standards No. 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters", May 13, 1987. The determination of filter gradation limits are based on the traditional Terzaghi filter criteria and the laboratory testing performed by Sherard and the US Soil Conservation Service. Current USBR design requirements for filters with respect to piping, permeability, discharge capacity, internal stability, and self-healing are described. Construction requirements are outlined and comments on differences between design and as-built are presented.

Several case histories are presented including :

- 1) Replacement of the toe drain at Crab Orchard Dam,
- 2) Failure of slope protection without an adequate filter design at Kingsley Dam, and
- 3) Use of filters at Calamus Dam (including the defensive features to control the large amount of anticipated foundation seepage).

Comments are presented on "Controversial Issues" of the bulletin outline, such as, the design of filters for widely-graded core materials, acceptance of Sherard's reliance on the critical filter to protect the core, and the potential value of a sand filter at the top of the dam on the upstream face of the core to act as a crack stopper.

Les documents suivants étaient aussi inclus avec la réponse :

USBR, 1987, « Design Standards no. 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters ».

USBR, Technical Memorandum no. NW-3620-19, New Waddell Dam, Central Arizona Project, Gradation Requirements for Filter/Drain Element.

Certains paragraphes des spécifications techniques de construction du barrage New Waddell, contenant des prescriptions et des méthodes de construction pour les filtres et les drains.

Un dessin montrant une section transversale du barrage en remblai de New Waddell.

The following items were enclosed with the submittal :

US Bureau of Reclamation, 1987, “ Design Standards No. 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters ”.

US Bureau of Reclamation, Technical Memorandum No. NW-3620-19, New Waddell Dam, Central Arizona Project, Gradation Requirements for Filter/Drain Element.

Specification paragraphs for construction of New Waddell Dam which contain earth material requirements and construction procedures for filters and drains.

Drawing showing the embankment cross-section for the New Waddell Dam.

RÉPONSES INDIVIDUELLES

ABADJIEV, Christo B.

Professor in Hydraulics

Technical University of Architecture and Civil Engineering

1, Str. Christo Smirnenski

1421 Sofia

Bulgarie

Le Professeur Abadjiev a fourni une copie de la seconde ébauche, datée de mai 1991, du document « Filtres et drains dans les barrages de stériles - Recommandations sur la conception » du Comité CIGB des Barrages de Stériles Miniers et Industriels. Le document discute des thèmes suivants :

- 1) Caractéristiques des barrages de stériles.
- 2) Objectif du drainage des barrages de stériles.
- 3) Construction des barrages de stériles.
- 4) Drainage de différents types de barrages de stériles.
- 5) Drainage en présence de fondations perméables.
- 6) Drainage correctif et additionnel durant l'exploitation.
- 7) Systèmes de filtre et drain dans les barrages de stériles.

Le document donne des descriptions détaillées de plusieurs méthodes de construction utilisées généralement pour les barrages de stériles, la fonction et l'utilisation de filtres et drains à l'intérieur du barrage et de sa fondation, et les critères de conception recommandés pour le dimensionnement des filtres et drains. L'annexe du document présente une analyse d'écoulement à travers les barrages de stériles construits selon la méthode amont de construction. Beaucoup d'informations sont incluses dans le document sur l'utilisation pratique de filtres et drains afin d'accélérer la construction et d'augmenter la sécurité des barrages de stériles.

Le document conclut que :

« L'infiltration à travers les barrages de stériles est potentiellement dangereuse mais peut être contrôlée en suivant des méthodes de construction appropriées, par une imperméabilisation, et par des drains et des filtres. Parmi les facteurs liés à la stabilité des barrages de stériles, le drainage est celui sur lequel on peut agir le plus facilement, de façon sûre et économique. »

RESPONSES FROM INDIVIDUALS

ABADJIEV, Christo B.

Professor in Hydraulics

Technical University of Architecture and Civil Engineering

1, Str. Christo Smirnenski

1421 Sofia

Bulgaria

Professor Abadjiev provided a copy of the second draft, dated May, 1991, of the document “Filters and Drains in Tailings Dams - Design Recommendations”, by the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams. The document discusses the following topics :

- 1) Tailings dams features.
- 2) Purpose of tailings dams drainage.
- 3) Tailings dams construction.
- 4) Drainage of various types of tailings dams.
- 5) Drainage when permeable foundations are present.
- 6) Additional and remedial drainage during operation.
- 7) Filter and drain systems in tailings dams.

The document provides detailed descriptions of the several construction methods commonly used for tailings dams, the function and use of filters and drains within the dam and its foundation, and the recommended design criteria for sizing filters and drains. The appendix to the document provides an analysis of seepage through tailings dams constructed using the upstream method of construction. Considerable information is included in the document on the practical application of filters and drains to enhance the construction and safety of tailings dams.

The document concludes :

“Seepage in tailings dams is dangerous but can be controlled by adequate construction methods, sealing, drains, and filters. Among all factors related to the tailings dam stability, drainage is the one that can be influenced most easily, safely, and economically.”

BRAUNS, Josef
Professor
University of Karlsruhe
Postfach 6980
Richard-Willstätter-Allee
D-7500 Karlsruhe 1
Allemagne

Le Professeur Brauns suggère que le bulletin ne devrait pas être conçu comme un livre académique, mais plutôt être aussi court que possible pour mieux servir des besoins bien définis, de préférence sous la forme d'une « norme ». La réponse commente aussi l'activité substantielle dans la recherche sur les filtres et leur performance, dans divers pays d'Europe.

Le Professeur Brauns a soumis un certain nombre d'articles techniques qui représentent une activité importante en Allemagne, plus particulièrement à l'Université de Karlsruhe.

- Brauns, J., 1985, « Stability of Layered Granular Soil under Horizontal Groundwater Flow », *Proceedings*, 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, Vol. V.
- Brauns, J., et Witt, K. J., 1987, « Proposal for an Advanced Concept of Filter Design », 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Irlande.
- Brauns, J., 1990, « Filters and Drains », Contribution to NATO Advanced Study Institute Advances in Rockfill Structures, Lisbonne, Portugal.
- Wittmann, L., 1979, « The Process of Soil-Filtration - Its Physics and the Approach in Engineering Practice », *Proceedings*, 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Brighton.
- Wittmann, L., 1977, « Some Aspects of Transport Processes in Porous Media », 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaïde, Australie.
- Wittmann, L., 1978, « Phenomena and Parameters of Two-Component Soil », International Symposium Fluid Mechanics and Scale Effects on the Phenomena in Porous Media, Thessalonique, Grèce.
- Heerten, G., et Wittmann, L., 1984, « Filtration Properties of Geotextiles and Mineral Filters Demonstrated by the Example of Bank Protection », 23rd International Man-made Fibres Congress, Dornbirn, Autriche.
- Witt, K. J., et Brauns, J., 1984, « The Influence of Parameter Variation on the Reliability of Filters », *Proceedings*, International Conference on the Safety of Dams, Coimbra.
- Heerten, G., et Wittmann, L., 1985, « Filtration Properties of Geotextile and Mineral Filters Related to River and Canal Bank Protection », *Geotextiles and Geomembranes 2*.
- Brauns, J., 1985, « Erosion in Layered Soil due to Horizontal Groundwater Flow (in German) », *Wasserwirtschaft 75*.
- Wittman, L., 1977, « Some Aspects of the Design of Natural and Fabric Filters (in German) », C. R. Coll. Int. Sols Textiles, Paris.

BRAUNS, Josef
Professor
University of Karlsruhe
Postfach 6980
Richard-Willstätter-Allee
D-7500 Karlsruhe 1
Republic of Germany

Prof. Brauns suggests that the bulletin should not be a textbook, but rather it should be as short as possible to serve well defined needs, preferably in the “ form of a standard ”. The response also comments on the substantial activity on filter research and performance in various locations in Europe.

Prof. Brauns submitted a number of technical papers which represent the considerable activity in Germany, especially at the University of Karlsruhe :

- Brauns, J., 1985, “ Stability of Layered Granular Soil under Horizontal Groundwater Flow ”, *Proceedings*, 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, Vol. V.
- Brauns, J., and Witt, K. J., 1987, “ Proposal for an Advanced Concept of Filter Design ”, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland.
- Brauns, J., 1990, “ Filters and Drains ”, Contribution to NATO Advanced Study Institute Advances in Rockfill Structures, Lisbon, Portugal.
- Wittmann, L., 1979, “ The Process of Soil-Filtration – Its Physics and the Approach in Engineering Practice ”, *Proceedings*, 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Brighton.
- Wittmann, L., 1977, “ Some Aspects of Transport Processes in Porous Media ”, 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia.
- Wittmann, L., 1978, “ Phenomena and Parameters of Two-Component Soil ”, International Symposium Fluid Mechanics and Scale Effects on the Phenomena in Porous Media, Thessaloniki, Greece.
- Heerten, G., and Wittmann, L., 1984, “ Filtration Properties of Geotextiles and Mineral Filters Demonstrated by the Example of Bank Protection ”, 23rd International Man-made Fibres Congress, Dornbirn, Austria.
- Witt, K. J., and Brauns, J., 1984, “ The Influence of Parameter Variation on the Reliability of Filters ”, *Proceedings*, International Conference on the Safety of Dams, Coimbra.
- Heerten, G., and Wittmann, L., 1985, “ Filtration Properties of Geotextile and Mineral Filters Related to River and Canal Bank Protection ”, *Geotextiles and Geomembranes 2*.
- Brauns, J., 1985, “ Erosion in Layered Soil due to Horizontal Groundwater Flow (in German) ”, *Wasserwirtschaft 75*.
- Wittmann, L., 1977, “ Some Aspects of the Design of Natural and Fabric Filters (in German) ”, C. R. Coll. Int. Sols Textiles, Paris.

- Wittmann, L., 1977, « The Stability of Sand-Gravel-Mixtures Against Suffosion (in German) », 5th Danube European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bratislava, CSSR.
- Wittmann, L., 1982, « Safety Aspects in Filter Design (in German) », *Wasserwirtschaft* 72.
- Wittmann, L., 1982, « Entwurf und Bemessung von Filterschichten, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen », Schriftenreihe der Arbeitsgruppe « Erd- und Grundbau », Heft 4.
- Wittmann, L., « Anwendung der Geotextilien anhand praktischer Beispiele », *Route et Trafic*, n° 3, mars.
- Wittmann, L., et Heerten, G., 1984, « Comparison of Filtration Characteristics of Mineral and Textile Filters (in German), 1 », *Nat. Symposium*, « Geotextilien im Erd- und Grundbau », Mainz, and *Strasse und Auto-Grundbau*, 35, Heft 6, juin.
- Witt, K. J., 1986, « Thesis, Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern », Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felmechnik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 104, Karlsruhe.
- Wittmann, L., 1980, « Thesis, Filtrations- und Transportphänomene in Porösen Medien », Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felmechnik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86, Karlsruhe.

BRAVO GUILLEN, Guillermo

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Grenade, Espagne

Bravo Guillen a soumis un exemplaire d'un rapport sur les essais de filtre et les critères de filtre (en espagnol), préparé pour la conférence de 1990 à Madrid. Le rapport discute les bases sur lesquelles s'appuie un choix de critères de filtres, incluant des considérations théoriques et empiriques. Sont inclus aussi les critères de filtre autour des tuyaux perforés et pour les géotextiles. Autres sujets inclus : l'épaisseur des filtres, les filtres amont, et la construction des filtres.

Le rapport comprend aussi un document décrivant les essais de laboratoire pour la conception des filtres du barrage Canales. Les essais ont été effectués selon l'essai de non-érosion de Sherard et ont démontré qu'un filtre de sable ($D_{15} = 0,4$ à $0,6$ mm) avec quelques graviers protégeait bien une argile non dispersive ($W_L = 67\%$, $IP = 39\%$) avec 98% passant le tamis n° 200 et 33% des particules inférieures à 5 microns.

CEDERGREN, Harry

Consulting Engineer
5245 Eye Street
Sacramento, Californie 95819
États-Unis

Cette réponse décrit les essais de filtre effectués par Cedergren en 1940 et aussi en 1963, pour démontrer la validité du critère $D_{15}/d_{85} = 4$ ou 5 . En se basant

- Wittmann, L., 1977, "The Stability of Sand-Gravel-Mixtures Against Suffosion (in German)", 5th Danube European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bratislava, CSSR.
- Wittmann, L., 1982, "Safety Aspects in Filter Design (in German)", *Wasserwirtschaft* 72.
- Wittmann, L., 1982, "Entwurf und Bemessung von Filterschichten, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen", Schriftenreihe der Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Heft 4.
- Wittmann, L., "Anwendung der Geotextilien anhand praktischer Beispiele", *Route et Trafic*, No. 3, Mars.
- Wittmann, L., and Heerten, G., 1984, "Comparison of Filtration Characteristics of Mineral and Textile Filters (in German), 1", *Nat. Symposium*, "Geotextilien im Erd- und Grundbau", Mainz, and *Strasse und Auto-Grundbau*, 35, Heft 6, Juni.
- Witt, K. J., 1986, "Thesis, Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern", Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 104, Karlsruhe.
- Wittmann, L., 1980, "Thesis, Filtrations- und Transportphänomene in Porösen Medien", Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Fermechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86, Karlsruhe.

BRAVO GUILLEN, Guillermo

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Granada, Spain

Bravo Guillen submitted a copy of a report on filter tests and filter criteria (in Spanish) prepared for a 1990 conference in Madrid. The report discusses the bases for selection of filter criteria, including theoretical and empirical considerations. Criteria for filters around perforated pipes and for geotextiles are included. Other topics include: thickness of filters, upstream filters, and construction of filters.

A document summarizing laboratory tests for the design of filters for the Canales Dam was also enclosed. Tests were conducted following Sherard's no erosion test and demonstrated that a sand filter ($D_{15} = 0.4$ to 0.6 mm) with some gravel sizes performed well against a non-dispersive clay ($W_L = 67\%$, $PI = 39\%$) with 98% passing the n° 200 sieve and 33% minus 5 microns.

CEDERGREN, Harry

Consulting Engineer
5245 Eye Street
Sacramento, California 95819
USA

This response describes filter tests performed by Cedergren in 1940 and again in 1963 to demonstrate the applicability of the $D_{15}/d_{85} = 4$ or 5 criterion. Based on

sur les résultats de ces essais, Cedergren a été complètement satisfait de la validité de ce critère. Ce travail est cité dans trois éditions du « *Seepage, Drainage, and Flow Nets* », dont il est l'auteur.

Cedergren indique que le second critère de Terzaghi, c'est-à-dire l'exigence sur la perméabilité, a été souvent mal appliqué. Il souligne le fait que les systèmes filtre/drain doivent non seulement satisfaire aux critères de filtre, mais aussi être en mesure d'évacuer les débits avec un grand coefficient de sécurité. Il préconise fortement l'utilisation de la formule de Darcy, $Q = kiA$ pour estimer les débits d'infiltration et, ainsi, concevoir correctement les systèmes de drainage à l'intérieur des barrages et de leurs fondations.

Cedergren commente comme suit :

« Je crois que la capacité d'évacuation des drains est un des sujets les plus importants du bulletin, du fait que plusieurs barrages à travers le monde, réalisés dans les 20 à 30 dernières années (et même maintenant), ont été construits avec des drains incapables d'évacuer les percolations sans nécessiter une charge hydraulique élevée. La plupart des concepteurs de barrages semblent croire que si un drain ou un filtre est conçu de façon que le D_{15} du filtre (ou du drain) soit au moins 4 ou 5 fois le d_{15} du sol à protéger, il aura une capacité de décharge suffisante.

Durant mes vingt dernières années comme ingénieur conseil et les dix années précédentes au cours desquelles j'ai contrôlé la sécurité des barrages pour la division de sécurité des barrages de Californie, un grand nombre de barrages avaient des problèmes d'infiltration dus à une déficience de la capacité d'évacuation des filtres et des drains. Quand l'écoulement se faisait à travers un filtre mince vers une couche de drainage constituée d'éléments plus grossiers, il n'y avait pas de problème d'évacuation; mais lorsque l'écoulement empruntait seulement un filtre ou un drain mince avec un faible gradient hydraulique, la capacité d'évacuation était généralement une faible fraction de ce qui était requis, et il en résultait que les ouvrages avaient des niveaux de saturation élevés et des charges hydrostatiques élevées dans des zones aval potentiellement dangereuses. Ceci fut vrai pour de grands barrages conçus et construits par les principaux constructeurs de barrages dans le monde dans les 20 à 30 dernières années, et peut être aussi vrai pour des barrages en cours de conception ou de construction.

Après que le critère de perméabilité de Terzaghi (D_{15} du filtre ≥ 4 à 5 fois d_{15} du sol) eût été bien accepté, on a développé la notion qui veut que le sable à béton et des granulats similaires satisfaisant aux critères de filtre soient théoriquement adéquats pour n'importe quelle situation de drainage. De tels matériaux (pouvant contenir jusqu'à 6 à 8 % de particules passant le tamis n° 200) sont assez fins pour prévenir les renards pour à peu près tous les sols érodables, mais ont des capacités extrêmement limitées en matière d'évacuation d'eau, plus spécialement sous de faibles gradients hydrauliques. Cette mauvaise application du critère de perméabilité de Terzaghi a conduit à la construction à travers le monde de nombreux barrages avec des filtres et drains ne pouvant convenablement protéger les installations qu'ils sont destinés à protéger. Des granulats de faible perméabilité furent largement utilisés pour des filtres et des drains, non seulement pour des barrages en remblai, mais aussi pour des fondations de routes, pour des mesures stabilisatrices de pentes,

these tests, Cedergren was fully satisfied with the applicability of the criterion. This work is cited in the three editions of *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, which he authored.

Cedergren states that Terzaghi's second criterion, i.e., the permeability requirement has been misapplied. He emphasizes that in addition to meeting filter criteria, filter/drain systems must also be able to handle the flow discharge with ample factor of safety. He strongly advocates use of the Darcy formula, $Q = kiA$, to estimate seepage flows and thus, to properly design drainage systems within dams and their foundations.

Cedergren comments as follows :

“ I believe that discharge capacity is one of the most important topics for the bulletin, because many dams throughout the world have been built in the past 20-30 years (and even now) with drains incapable of removing seepage without large head build-up. Most dam designers seem to believe that if a filter or drain is designed so that the D_{15} of the filter (or drain) is at least 4 or 5 times the d_{15} of the protected soil it will have adequate discharge capacity.

In my recent 20 years as a consultant and the prior 10 years of reviewing dams for safety for the California Division of Safety of Dams, a large number that were having seepage problems, had their problems caused by lack of discharge capacity of filters and drains. When flow was *across* the thin dimension of a filter into a coarser drainage layer, there generally were no discharge problems, but when flow was along the thin dimension of a filter or drain under small hydraulic gradient, the discharge capacity was usually only a small fraction of that needed, with the result that the structures had high saturation levels and large hydrostatic heads in dangerous downstream areas. This has been true of some large- size dams designed and built by major dam builders of the world in the past 20-30 years and may be true of dams currently under design or construction.

After the Terzaghi permeability criterion (D_{15} of filter T times the d_{15} of a soil) had been well accepted, the notion developed that concrete sand and comparable aggregate meeting the filter criterion were suitable for virtually any drainage situation. Such materials (which may contain up to 6-8 % of material passing a No. 200 sieve) are fine enough to prevent piping of nearly all erodible soils, but have extremely limited water-removing capabilities, especially under low hydraulic gradients. This mis-application of Terzaghi's permeability criterion has resulted in the construction world-wide of countless dams with filters and drains that cannot properly protect the facilities they are intended to protect. These low-permeability aggregates have been widely used in filters and drains not only for earthfill dams, but also for roadbeds, slope-stabilizing measures, and drains for many other kinds of works needing protection from water. The same fundamental seepage principles apply to all such applications, and wherever any appreciable amounts of water need

et pour des drains dans plusieurs autres types d'ouvrages nécessitant une protection contre l'eau. Les mêmes principes fondamentaux d'écoulement s'appliquent pour tous les cas et partout où il y a des quantités appréciables d'eau qu'il faut drainer; les capacités de décharge doivent être déterminées par des analyses d'écoulement appropriées et des calculs d'évacuation.

Voici un cas récent. A la fin de 1979, j'étais parmi un grand nombre de concepteurs de barrages un de ceux qui ont analysé la rupture, le 30 octobre 1979, du réservoir du Comté de Martin en Floride (voir *Civil Engineering Magazine*, ASCE, janvier 1981, pp. 46 et 47). Notre objectif était de recommander un système de drainage qui aurait de grandes chances de prévenir les ruptures à l'avenir. La plupart des autres ingénieurs, incluant des consultants connus internationalement, pensaient qu'une couche de 12 po d'épaisseur de sable à béton, avec un $k = 7 \times 10^{-3}$ cm/s, utilisée dans un tapis drainant à l'intérieur du talus aval, ainsi qu'un nouveau drain de pied, pourraient intercepter l'infiltration à travers le barrage en sable et sa fondation de sable, et la diriger vers une conduite collectrice transportant l'eau vers des puisards à partir desquels elle pourrait être évacuée de façon sûre. J'avais déjà vu dans le passé plusieurs barrages et jetées qui avaient de tels matériaux pour filtres et drains et je savais que la capacité d'une couche de sable à béton à évacuer l'eau pouvait être strictement limitée. Aussi, sachant qu'une couche de coquillages perméable située plusieurs pieds sous la couche de sable de surface avait probablement causé la rupture initiale, j'ai jugé que le nouveau système devrait avoir une capacité pour évacuer l'eau librement. J'ai donc effectué des calculs simples sur la base de la loi de Darcy, qui indiquaient que la couche de sable à béton évacuerait seulement 1 ou 2 gpm pour chaque 100 pieds de longueur de l'ouvrage, ce qui, à mon avis, ne procurerait pas une marge de sécurité adéquate pour les quantités d'eau potentielles qui pourraient circuler à travers le barrage et sa fondation de sable et de coquillages. J'ai suggéré une solution consistant en une couche de pierre concassée ou de gravier de 12 po d'épaisseur, de 3/8 à 1 po de diamètre ($k = 7$ cm/s), protégée par des filtres en géotextile de grande qualité, et j'ai calculé qu'un tel système serait en mesure d'évacuer environ 2 000 gpm pour chaque 100 pieds de l'ouvrage, procurant ainsi un coefficient de sécurité substantiel vis-à-vis de débits d'infiltration potentiellement dangereux ».

Les recommandations de Cedergren concernant la nécessité de procurer une capacité d'évacuation suffisante pour les barrages en remblai et leurs fondations sont présentées dans plusieurs de ses publications et dans la note suivante :

Cedergren, Harry R., 1989, *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, John Wiley & Sons, New York, NY.

CREEGAN, Pat
Engineering-Science, Inc.
600 Bancroft Way
Berkeley, Californie 94710
États-Unis

Engineering-Science, Inc. suit généralement les critères recommandés par Sheppard, ASCE Geot. Journal, juin, 1984, c'est-à-dire, $D_{15}/d_{85} = < 5$.

La réponse porte sur les zones de transition en association avec les systèmes filtre/drain-cheminée, l'utilisation d'un drainage interne, les tapis de drainage sur

to be drained, discharge capacities should be established by appropriate seepage analyses and discharge calculations.

Here is a recent case. In late 1979 I was one of a large number of dam designers who reviewed the Oct. 30, 1979 failure of the Martin County Reservoir in Florida (see Civil Engineering Magazine, ASCE, Jan. 1981, pp. 46-47). Our objective was to recommend a drainage system that would have a high chance of preventing failures in the future. Most of the other engineers, including internationally known consultants, felt that a 12-in. thick layer of concrete sand $k = 7 \times 10^{-3}$ cm/s used in a drainage blanket within the downstream slope and a new toe drain could intercept seepage through the sand dam and its sand foundation and feed it to a pipe collector system carrying the water to sumps from which it could be safely removed. I had previously encountered many dams and levees that had such materials in filters and drains and knew the water-removing ability of a layer of concrete sand would be strictly limited. Also, knowing that a layer of permeable seashells several feet under the top sand layer had probably caused the original failure, I felt that the new system should have a liberal water removing capability. Accordingly, I made simple calculations with Darcy's law which indicated that the concrete sand layer could remove only 1 or 2 gpm for each 100-ft length of the structure, which I felt would not provide an adequate margin of safety for possible amounts of water that would leak through the dam and its sand and seashell foundation. I suggested an alternate design that would have a 12- in. thick layer of crushed rock or gravel, 3/8 in. to 1 in. size, ($k = 7$ cm/s) protected with high quality fabric filters, and calculated that such a system would be able to remove about 2000 gpm for each 100 feet of structure, thus providing a substantial factor of safety against potentially harmful seepage rates."

Cedergren's recommendations concerning the necessity for providing ample discharge capacity within embankment dams and their foundations are presented in many of his publications and in the following text :

Cedergren, Harry R., 1989, *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, John Wiley & Sons, New York, NY.

CREEGAN, Pat
Engineering-Science, Inc.
600 Bancroft Way
Berkeley, California 94710
USA

Currently, Engineering-Science, Inc. follows the criteria recommended by Sherard, ASCE Geot. Journal, June, 1984, i.e., $D_{15}/d_{85} = < 5$.

The response discusses transition zones vs. chimney filter/drain systems, use of internal drainage, blanket drains on the abutments, collector drains in the valley

les appuis, les drains collecteurs dans la vallée et la construction de cheminées verticales, c'est-à-dire l'utilisation de boîtes d'épandage et de levées horizontales mises en place en avance sur les zones adjacentes, et l'excavation d'une tranchée allant jusqu'à 5 pieds de profondeur pour assurer le contact avec le matériau sous-jacent de la cheminée. Deux cas sont présentés, illustrant une cheminée verticale étroite de filtre/drain.

DASCAL, Oscar
Dam Safety Directorate
Hydro-Québec
Canada

Les observations et les commentaires suivants sont extraits de la réponse :

« Considérant la confusion et la mauvaise interprétation des termes drain et filtre, le bulletin doit spécifier le rôle de chacun et clairement définir leur sens.

Par exemple : les rôles suivant peuvent être mentionnés :

A) Drain : destiné à collecter, écouler et évacuer l'eau de surface ou l'eau de percolation, et/ou à diminuer la pression ou la sous-pression dans les barrages et/ou leur fondation.

B) Filtre : destiné à collecter et écouler l'eau de percolation (infiltration) sans qu'il y ait de particules solides en suspension. Ainsi, les particules solides détachées et transportées par l'eau de percolation sont retenues au contact avec le filtre ou dans le filtre. De par cette action, le filtre prévient le renard (érosion interne) dans le matériau adjacent, et en même temps, en écoulant l'eau, le développement des pressions interstitielles ou des sous-pressions est annulé.

Par conséquent, les définitions suivantes sont proposées :

1) Drain : un matériau, un ouvrage ou un dispositif utilisé pour collecter, écouler et évacuer l'eau (fluide), et/ou pour décharger la pression interstitielle ou la sous-pression dans le barrage et sa fondation.

2) Filtre : une zone poreuse, perméable, ou un matériau à travers lequel l'eau (fluide) peut s'écouler, mais qui empêche le passage ou le transport des particules solides en suspension.

Dans la technique des barrages en remblai, les filtres le plus plus souvent utilisés sont « des filtres granulaires » qui peuvent être définis comme suit :

3) Filtre granulaire : une bande ou une couche d'un matériau granulaire de granulométrie naturelle ou ayant subi un traitement, incorporée dans le barrage ou dans sa fondation, qui permet à l'infiltration de s'écouler à travers ou le long du filtre (bande ou couche), mais qui prévient le transport (migration) des particules solides détachées du matériau adjacent par érosion.

Comme résultat des définitions ci-dessus, on peut souligner que le filtre peut agir comme drain; cependant, le drain ne peut remplir le rôle d'un filtre. Le filtre est par conséquent considéré comme une zone protectrice, prévenant le développement de renards ou d'une érosion interne dans les matériaux adjacents, appelés en général matériaux de base.

and construction of vertical chimneys i.e., use of spreader box and horizontal lifts placed ahead of adjacent zones and trenching through up to 5 feet of fill to make contact with the underlying chimney. Two case histories are presented that illustrate thin vertical chimney filter/drains.

DASCAL, Oscar
Dam Safety Directorate
Hydro-Quebec
Canada

The following observations and comments are excerpts from the response :

“ Considering the confusion and misinterpretation of the terms drain and filter, the Bulletin should specify the role of each of them and subsequently define clearly their meaning.

As an example : The following roles can be mentioned :

A) Drain : To collect, to carry away and to discharge surface or percolating water and/or to relieve pore or uplift pressure in the dams and/or its foundation.

B) Filter : To collect and carry away percolating (seepage) water without solid particles in suspension. Thus the solid particles detached and transported by the percolating water are retained at or in the filter. By this action the filter prevents piping (internal erosion) in the adjacent material, at the same time carrying away the water the build up of pore of uplift pressure is hindered.

Consequently the following definitions are proposed :

1) Drain : Device, work or facility used to collect, carry away and discharge water (fluid) and/or to relieve pore or uplift pressure in the dam or its foundation.

2) Filter : A pervious, porous zone or material through which water (fluid) can flow but which prevents the passage or transportation of solid particles in suspension.

In embankment dams engineering, the most often used filters are the “ granular filters ” which can be defined therefore as :

3) Granular Filter : A strip or layer of graded (naturally or by selection) granular material incorporated in the dam or its foundation which allows seepage to flow across or along the filter (strip of layer) but which prevents the transportation (migration) of solid particles detached by erosion of the adjacent material.

As a result of the above definitions, it can be pointed out, that the filter can act as a drain; however the drain cannot fulfill the role of a filter. The filter therefore is considered as a protecting element, preventing the development of piping or internal erosion in the adjacent materials, called in general “ base ” materials.

Les drains sont installés dans des matériaux non érodables (roche, béton); dans le remblai ou les sols de fondation, ils sont remplacés par des filtres, ou un filtre est mis en place à l'interface du matériau de base et du drain.

Spécifications de compactage :

Les anciennes spécifications (Hydro-Québec) pour compacter les filtres à 70-80 % de densité relative semblent avoir favorisé le développement du phénomène de voûte, lequel est probablement responsable d'une certaine fissuration horizontale, et donc de fuites concentrées, ainsi que cela s'est produit au barrage principal de Manicouagan 3. Considérant le fait que le sable relativement uniforme (sable à béton), utilisé en tant que filtre pour la protection de la moraine glaciaire, peut être facilement compacté, les exigences de compactage pour les filtres ont été relâchées; le compactage obtenu uniquement par la circulation du matériel de transport et d'épandage semble être suffisant.

Le développement de fissures et leur danger furent mis en relief par le Professeur A. Casagrande :

' Une autre erreur est de concevoir les zones de filtre trop minces entre le noyau et la zone aval en enrochement. Lorsque des fissures de tension se développent à travers le noyau, il y a des chances qu'elles se propagent à travers les couches de filtre et alors la protection du noyau est perdue. '

Dans ce contexte, le Professeur A. Casagrande a aussi préconisé l'utilisation d'un filtre amont adéquat. Tout en notant que quelques fissures peuvent se développer pendant le remplissage du réservoir, il a fait les commentaires suivants :

' Si le remplissage est effectué lentement, de telles fissures peuvent se refermer par gonflement et/ou par l'infiltration de fines provenant du filtre amont ou des zones de transition. Lorsque le remplissage se fait rapidement, de telles fissures peuvent s'ouvrir sous l'effet de la pression hydrostatique dans la fissure; et c'est ainsi qu'une tendance de la fissure à se propager à travers les zones étroites de filtre peut se développer. Ceci est particulièrement dangereux si la recharge aval est composée de gros enrochements. ' ”

DE MELLO, Prof. Victor F. B.

Rua das Madressilvas 43

CEP 04704

Brooklin, Sao Paulo

Brésil

Le Professeur de Mello insiste sur la nécessité des systèmes filtre/drain-cheminée à l'intérieur d'un barrage en remblai. Une fois ceci accepté comme une exigence fondamentale, l'autre importante considération devient la compatibilité de déformation entre les zones. La redistribution des contraintes-déformations et la suspension du noyau sur le système filtre/drain granulaire plus rigide, vertical ou presque, deviennent importantes.

Le Professeur de Mello fournit les références suivantes :

de Mello, Victor, F. B., 1975, Except from paper presented in the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, septembre, Vol. II, pp. 303 et 304. Cet extrait fournit un

The drains are installed in non-erodible materials (rock, concrete); in the fill or foundation soils, they are replaced by filters or a filter is placed at the interface of the base material and the drain.

Compaction Requirements :

Previous requirements (Hydro-Quebec) to compact filters to 70-80 % relative density, seems to have favored the development of arching phenomenon, which is probably responsible for the occurrence of some horizontal cracking, and consequently of concentrated leaks, as experienced at Manicouagan 3 Main Dam. Considering that the relatively uniform sand (concrete sand), used as filter for glacial till protection, can be easily compacted, the compaction requirement for filters have been relaxed; compaction achieved only by the movement of transportation and spreading equipment seems to become acceptable.

Development of cracks and their danger were emphasized by Prof. A. Casagrande :

' Another mistake is to design the filter zones between a core and a downstream rockfill zone too thin. When tension cracks develop through the core they are liable to propagate through the filter layers and then the protection of the core is lost. '

In this context, Prof. A. Casagrande has advocated the use of an adequate upstream filter also. While observing that some of the crackings (fissures) can develop before the reservoir is filled, he made the following comments :

' If filling is carried out slowly, such cracks may heal themselves by swelling and/or infiltration of fines from the upstream filter or transition zones. When filling is done rapidly, such cracks may become wider due to the hydrostatic pressure in the crack; and then the tendency may develop for the crack to propagate through thin filter zones. This is particularly dangerous if the downstream shell consists of coarse rockfill. ' "

DE MELLO, Prof. Victor F. B.

Rua das Madressilvas 43
CEP 04704
Brooklin, Sao Paulo
Brazil

Prof. de Mello emphasizes the need for chimney filter/drain systems within the embankment dam. Once this is accepted as a fundamental requirement, the next important consideration becomes compatibility of deformability between zones. Stress and strain redistribution, and hang-up of core on stiff vertical or nearly vertical granular filter/drain systems become important.

Prof. de Mello provided the following references :

de Mello, Victor F. B., 1975, excerpt from paper presented in the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, September, Vol. II, pp. 303-304. This excerpt provides a

essai simple sur la courbe granulométrique pour vérifier l'effet d'une discontinuité inacceptable quant à l'instabilité interne.

de Mello, Victor F.B., 1987, Section 44.4.4, Filter transition materials, Section 44.4.5, Well-graded materials of wide range of grains sizes, *Ground Engineer's Reference Book*, Butterworth's, London.

de Mello, Victor F. B., 1977, « The Rankine Lecture », *Geotechnique*, 27 (3), pp. 279 à 355, septembre.

Silveira, A., 1965, « An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters », *Proceedings*, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, pp. 551 à 555, Canada.

Varde, Oscar, 1989, Excerpt from theme lecture « Embankment Dams », *Proceedings*, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, août.

DOMER, Ronald

Pacific Gas and Electric Company
One California Street
San Francisco, CA 94106
États-Unis

La réponse suivante a été donnée au questionnaire :

« **Évolution de la conception et de la construction des filtres** – Durant les années 1940 et 1950, l'utilisation de filtres granulaires dans des barrages en terre fut incorporée à l'aide de sections transversales zonées avec des drains-cheminée et des tapis de drainage. Les critères de filtre du Corps of Engineers ont été utilisés pour choisir la courbe granulométrique du matériau filtre. Durant les années 1960, une seule couche de filtre fut utilisée avec une granulométrie étalée.

Spécifications de conception et pratiques de construction – Les critères généraux de conception des filtres suivent ceux de l'US Corps of Engineers en ce qui concerne les spécifications de rétention et de perméabilité. La dimension maximale du matériau filtre est limitée à 75 mm, 40 à 55 % passant le tamis n° 4 et pas plus de 5 % passant le tamis n° 200. Les spécifications de construction comprennent la mise en place des matériaux du filtre en levées horizontales et leur compactage par un rouleau vibrant lisse. Les matériaux du filtre sont compactés en couches de 9 po à une densité au moins équivalente à 70 % de la densité relative.

Exemples – Le barrage Iron Canyon fut conçu par Pacific Gas and Electric au début des années 1960. Il est situé sur la rivière Iron Canyon Creek, un affluent de la rivière Pit. C'est un remblai homogène avec un filtre-cheminée vertical et un tapis de drainage. Le filtre-cheminée a une largeur de 12 pieds et est conçu pour permettre l'écoulement des percolations sans donner naissance à des pressions interstitielles élevées.

Points de vue controversés – L'utilisation de géotextiles à la place de filtres granulaires doit être considérée pour les cas suivants :

i) Le filtre en géotextile pourrait être inclus lors d'une modification de la conception (réparation) d'un barrage pour gagner une revanche additionnelle lors des crues;

simple test on the gradation curve to check unacceptable gap grading with respect to internal instability.

- de Mello, Victor F. B., 1987, Section 44.4.4, Filter transition materials, Section 44.4.5, Well-graded materials of wide range of grain sizes. *Ground Engineer's Reference Book*, Butterworth's, London.
- de Mello, Victor F. B., 1977, "The Rankine Lecture", *Geotechnique*, 27(3), pp 279-355, September.
- Silveira, A., 1965, "An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters", *Proceedings*, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, pp 551-555, Canada.
- Varde, Oscar, 1989, excerpt from theme lecture "Embankment Dams", *Proceedings*, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, August.

DOMER, Ronald

Pacific Gas and Electric Company
One California Street
San Francisco, CA 94106
USA

The following response to the questionnaire was provided :

“ Evolution of Filter Design and Construction – During the 1940's and 1950's, the use of granular filters in earthfill embankment dams was incorporated by zoned cross sections with chimney drains and drainage blankets. Corps of Engineers filter criteria were used for designing filter material gradation. During the 1960's, single layer filter material was used with broad gradation.

Design Requirements and Construction Practices. – The general design criteria for filters follow Corps of Engineers filter criteria for retention and permeability requirements. The maximum size of filter material is restricted to 75 mm, 40 to 55 percent passing the No. 4 sieve, and no more than 5 percent passing the No. 200 sieve. Construction control includes placement of filter materials in horizontal lifts and compaction by smooth-drum vibratory roller. Filter materials are compacted in layers of 9 inches to a density of at least 70 percent relative density.

Case Histories. – Iron Canyon Dam was designed by Pacific Gas and Electric in the early 1960's, located on Iron Canyon Creek, a tributary of Pit River. It is a homogeneous earthfill embankment with a vertical chimney filter and blanket drain. The chimney filter is 12 feet wide and designed to allow seepage flow without development of high pore pressure.

Controversial Issues. – Use of geotextiles as a substitute for granular filter should be considered in the following cases :

- i) The geotextile filter could be included in the modified design (repair) of a dam to gain additional freeboard during flood loading.

- ii) Pour isoler le système de drain des sols fins de la fondation.

GALLOWAY, John H. H.

43 Spencer St.
Wellington 4
Nouvelle-Zélande

Galloway signale le danger de ne pas bien définir les termes et suggère que les concepts de drainage et de filtration soient séparés. Il mentionne que la fonction du filtre de sable placé à l'amont d'une zone étanche pour colmater les fissures n'est pas véritablement de filtrer ou de drainer, mais bien de « calfater » celles-ci.

Galloway résume sommairement l'expérience acquise en Nouvelle-Zélande sur les matériaux filtres placés sous les chaussées.

HARLAN, Richard C.

Harlan Tait Associates
1269 Howard Street
San Francisco, Californie 94103
États-Unis

Dans sa première réponse, Harlan suggère que le bulletin présente une discussion tant sur les systèmes filtre/drain que sur l'utilisation des filtres.

Les problèmes associés aux systèmes filtre/drain comprennent :

- 1) L'incapacité d'un filtre/drain-cheminée à maintenir la nappe phréatique suffisamment basse à l'intérieur de la recharge aval, et
- 2) La migration des fines vers la base du drain-cheminée ou vers le sous-drain, causant leur colmatage et une réduction de leur capacité de drainage.

Dans sa seconde réponse, Harlan fait des commentaires sur l'ébauche du rapport et intervient sur différents sujets de la façon suivante :

« **Tuyaux collecteurs perforés.** L'utilisation de tuyaux à l'intérieur des barrages est un sujet quelque peu controversé. Ils forment un trou dans le barrage. Assurément, certains concepteurs les considèrent comme des géotextiles : on peut les utiliser si on possède déjà une bonne première ligne de défense. D'autres utiliseront ces tuyaux seulement s'ils sont entourés par une quantité suffisante de matériau à drainage libre pour assurer le maintien de la fonction de drainage en cas d'affaissement du tuyau ou de sa dégradation.

Largeur/épaisseur des filtres. La largeur des filtres verticaux ou inclinés est basée sur une capacité suffisante d'évacuation des eaux, sur les contraintes de construction et sur des considérations spéciales, telles qu'un déplacement causé par une secousse sismique. Les filtres inclinés sont ordinairement mis en place et compactés en couches de moins de 0,5 m d'épaisseur à l'aide d'un matériel hautement spécialisé (Barrage Briones, vers 1960), mais pour les filtres verticaux et inclinés les tolérances de construction et les limites du matériel combinées à la capacité d'évacuation requise permettent rarement des largeurs inférieures à 1 m. Lowe (Jansen,

- ii) To isolate a drain system from fine-grained foundation soils.”

GALLOWAY, John H. H.

43 Spencer St.
Wellington 4
New Zealand

Galloway warns of the danger in not defining terms properly, and suggests that the concepts of drainage and filtering be separated. He mentions that the function of a sand filter placed upstream as a crack stopper is not properly a filter or drainage function but rather a “staunching” of flow through the crack.

Galloway also summarizes some of the experience in New Zealand filter materials placed beneath pavements.

HARLAN, Richard C.

Harlan Tait Associates
1269 Howard Street
San Francisco, California 94103
USA

In a first response, Harlan suggests that the bulletin include discussion of filter/drain systems as well as the use of filters.

Problems with filter/drain systems include :

- 1) Inability of filter/drain chimney drain to maintain a low phreatic line within the downstream shell, and
- 2) Migration of fines to the base of the chimney or to the underdrain, causing plugging and loss of drain capacity.

In a second response, Harlan commented on the first draft and expanded on several topics as follows :

“ **Perforated collector pipes.** The use of pipes in dams is somewhat controversial. They form a hole in the dam. Certainly some designers consider them to be like geotextiles : alright to use if you have another complete line of defense. Some designers would use pipes only if they are surrounded by enough free draining material so that the collapse or eventual deterioration of the pipe would not result in loss of drain function.

Width/Thickness of Filters. The width of vertical or sloping filters is generally based on the necessary hydraulic discharge capacity, construction limitations and on special considerations such as potential displacement due to earthquake. Sloping filters have been placed and compacted at thicknesses less than 0.5 m using highly specialized equipment (Briones Dam, about 1960) but for vertical and sloping filters, construction tolerances and equipment limitations combined with the discharge requirements rarely permit widths of less than 1 m. Lowe (Jansen, 1988) describes placement of two filters simultaneously ' one-half (construction) lane

1988) décrit la mise en place simultanée de deux filtres (construction en demi-largeur), en utilisant une épandeuse munie d'une boîte. Les largeurs types minimales sont de 1,5 m et des largeurs de 5 m sont fréquentes pour les grands ouvrages.

Pour les filtres horizontaux, les restrictions liées à la construction sont moins sévères; Lowe cite une épaisseur de 0,3 m, indiquant qu'une épaisseur de 0,6 m était plus courante. La capacité d'évacuation et des conditions spéciales peuvent nécessiter une plus grande épaisseur. A la base des drains verticaux, au point de raccordement avec les tapis drainants horizontaux, les concepteurs prévoient souvent une zone de plus grande épaisseur pour faire face au colmatage par de la poussière de roche et les fines qui sont lessivées dans le drain-cheminée depuis son sommet jusqu'à sa base.

Ségrégation. Le phénomène de ségrégation dans les filtres survient durant la mise en place, lorsque les matériaux de grandes dimensions tendent à rouler vers le bord extérieur de la zone d'épandage. Ce roulement met les grosses particules en contact avec le matériau à protéger, situation qui est la moins souhaitable. L'effet de ségrégation peut être minimisé par une bonne conception et par des techniques de construction appropriées. Le champ de la distribution granulométrique doit être réduit. Les critères de conception usuels de l'US SCS et de l'USBR comprennent des règles limitant la distribution des grains. La grosseur maximale, en particulier, doit être limitée parce que les grosses particules se séparent plus facilement, causant les pires effets. Plus le matériau filtre sera grossier, plus la distribution granulométrique sera étroite pour réduire sa tendance à la ségrégation. Les coefficients d'uniformité appropriés pour les sables peuvent aller jusqu'à 6, mais ne pas dépasser 3 pour les graviers et cailloux.

La ségrégation peut être réduite au minimum par des méthodes de mise en place appropriées. Le matériau filtre doit être déversé à partir d'une hauteur la plus faible possible, de façon à réduire la vitesse de "roulement" des grosses particules. Le déversement depuis des bennes de chargeuses ou des camions à benne basculante favorise la ségrégation, en particulier lorsque le déversement se fait perpendiculairement à l'axe du filtre. Les boîtes d'épandage qu'on traîne au ras du sol pour l'épandage d'une couche uniforme de filtre et qui comporte des déflecteurs pour mélanger le matériau durant l'opération réduit la ségrégation. Lowe décrit et illustre (Jansen 1988, page 273) l'épandage simultané de filtres multiples à l'aide d'une boîte d'épandage. Pour réduire au minimum le potentiel de ségrégation des filtres, on peut aussi utiliser des camions à déchargement par le fond, avec ouverture restreinte (entravée par des chaînes ou câbles) et circulant dans l'axe du filtre. De telles méthodes améliorent le contrôle de la position et de la qualité de la zone de contact entre matériaux juxtaposés. »

HOEG, Kaare

Managing Director, Norwegian Geotechnical Institute
PO Box 40 Tansen
N-0801 Oslo 8
Norvège

Le texte suivant est extrait (et traduit) du Manuel n° 2 du NGI « Rockfill Dams in Norwegian Practice », 1986 :

« La moraine utilisée dans un noyau imperméable doit contenir suffisamment de fines, sans présence excessive de grosses pierres.

wide', using a spreader box. Typical minimum widths are 1.5 m and widths of 5 meters for major structures are not uncommon.

For horizontal filters, the construction limitations are less severe, Lowe cites thickness as little as 0.3 m with 0.6 m being more usual. Discharge capacity and special circumstances may require greater thickness. At the base of vertical filters, where joined to horizontal drain blankets, designers frequently provide a thickened zone to provide for some clogging by rock dust and fines which are washed down through the chimney drain to the base.

Segregation. Segregation of filters occurs during placement as the larger sizes tend to roll toward the outer edge of the zone being placed. Such rolling places the largest sizes at the contact with the base material, the most adverse location. Segregation can be minimized by appropriate design and construction procedures. The range of grain sizes should be limited. The current design standards of the US SCS and the USBR provide guidelines for limiting the range of sizes. The maximum size particularly should be restricted because those largest sizes segregate most readily and with greatest adverse effect. The coarser the filter, the narrower the gradation must be to minimize the tendency to segregate. Suitable Uniformity Coefficients are up to about 6 for sands and up to 3 for gravel and cobble sizes.

Segregation can be minimized by appropriate placement methods. The filter material should be dropped as little vertical height as possible so that the 'rolling' velocity of the large sizes is minimized. Dumping from elevated front-end loader buckets or from dump truck beds promotes segregation particularly if dumping is perpendicular to the axis of the filter. Spreader boxes which are dragged on the ground to 'lay' the filter with baffles to mix as the material is laid minimize segregation, Lowe described and illustrated (Jansen 1988, page 273) multiple filters being placed at the same time by a spreader box. Also bottom dump trucks with restricted door openings (hobbled by chains or cables) and travelling along the axis of the filter, can be used to minimize potential segregation of filters. Such methods provide improved control on the location and quality of the contact zone between adjacent materials."

HOEG, Kaare

Managing Director, Norwegian Geotechnical Institute
PO Box 40 Tasen
N-0801 Oslo 8
Norway

The following are excerpts from the NGI Manual No. 2 "Rockfill Dams in Norwegian Practice", 1986 :

"Moraine for use in an impervious core must have a sufficient content of fines and no excessive amount of stones.

La teneur en fines doit être suffisante pour assurer une perméabilité raisonnablement basse et la teneur en pierres doit être limitée de façon à prévenir une ségrégation créant des concentrations de pierres dans le noyau. De plus, la grosseur maximale des pierres doit être limitée, généralement à moins des deux tiers de l'épaisseur réelle de la couche épandue.

... Un critère courant utilisé pour définir la teneur en fines requise dans la moraine s'établit comme suit : au moins 15 % des matériaux de granulométrie 19 mm et plus petite doivent passer le tamis standard de 0,074 mm.

... Le filtre doit répondre à certains critères de distribution granulométrique. Les grains doivent être durables et pouvoir résister à l'action de compactage, aux déformations et aux intempéries sans s'effriter au point de changer les distributions granulométriques.

... Tenant compte du fait que les filtres sont d'une extrême importance pour la sécurité des barrages, des critères stricts et bien établis pour la distribution granulométrique des matériaux filtres sont présentés dans le Tableau suivant :

Critères pour la distribution granulométrique d'un matériau filtre

Matériau de base Filtre	Uniforme $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 1,5$	Bonne granulométrie $\frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$
Uniforme $\frac{D_{60}}{D_{10}} < 1,5$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 10$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 15$ $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$
Bonne granulométrie $\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 6$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{D_{85}} < 5$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 40$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{D_{85}} < 5$

Le but des filtres est de prévenir l'érosion. Les fines peuvent être lessivées même si le filtre peut retenir les plus grosses particules. En relation avec le Tableau présenté ci-dessus, les stipulations additionnelles suivantes s'appliquent donc :

Dans le cas d'une moraine, seule la fraction 0-60 mm de l'ensemble du matériau doit être considérée comme matériau de base. La distribution granulométrique des filtres doit être déterminée sur l'ensemble du matériau considéré comme un tout.

La convenance d'un matériau à être utilisé comme filtre dans un barrage en remblai est estimée à partir de la courbe de distribution granulométrique comparée à celle du matériau de base.

The content of fines must be sufficient to secure a reasonably low permeability and the content of stones must be limited so as to prevent segregation of stone surplus in the core. Also the maximum size of the stones must be restricted, generally to less than two thirds of the actual placement layer thickness.

... A common criterion for the required fineness of moraine is that at least 15 % of the material of grain size 19 mm and smaller shall pass through a 0.074 mm gauge meshed sieve.

... Filter material must fulfill certain grain-size distribution criteria. The grains must be durable and able to resist compaction, strains and weathering forces without crumbling to an extent which would essentially change the grain-size distributions.

... As adequate filters are of utmost importance for the safety of a dam, well established strict criteria for the grain-size distribution of filter materials are presented in the following table.

Criteria for Grain Size Distribution in Filter Material

Filter	Base	
	Uniform $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 1.5$	Well graded $\frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$
Uniform $\frac{D_{60}}{D_{10}} < 1.5$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 10$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 15$ $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$
Well graded $\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 6$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{D_{85}} < 5$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 40$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{D_{85}} < 5$

The purpose of filters is to prevent erosion. Fines may be washed out even when the filter is capable of retaining coarser particles. In connection with the above Table, therefore, the following additional stipulations apply :

For moraine, only the 0-60 mm fraction of the total material shall be considered as base material. For filters the grain-size distribution shall be determined on the total material as a whole.

The suitability of a material for use as filter in an embankment dam is judged by its grain-size distribution curve as compared to the grain size distribution of the base material.

Les variations probables à l'intérieur du matériau de base doivent être estimées. Étant donné que le filtre doit couvrir ces variations, les limites supérieure et inférieure d'un fuseau granulométrique acceptable pour un filtre dépendent de la variabilité du matériau de base. Si le matériau de base est très variable, les limites du fuseau granulométrique seront rapprochées. Si la variation du matériau de base est petite, les limites du fuseau seront élargies.

Les critères définissant le filtre s'appliquent aux zones adjacentes dans tout le barrage. Les zones avec fuseaux granulométriques étendus ou étroits imposeront des limites plus strictes sur la granulométrie des zones adjacentes, ce qui peut nécessiter parfois des zones additionnelles de granulométries intermédiaires dans le barrage.

Les matériaux filtres idéaux pour une moraine type seraient un mélange de sable et gravier bien distribué, sans pierre au-delà de la dimension 50-100 mm. Un matériau constitué de roche dynamitée avec une proportion modérée de grosses pierres (< 200 mm) et de fines devrait normalement convenir comme transition à l'enrochement adjacent plus grossier. »

HONJO, Yusuke

Asian Institute of Technology
GPO Box 2754
Bangkok 10501
Thaïlande

Le Professeur Honjo, dans deux de ses publications techniques, suggère que les matériaux de base ayant un « indice d'auto-cicatrisation » (d_{95}/d_{75}) élevé soient traités avec grand soin. Le critère classique, $D_{15}/d_{85} < 4$ ou 5, n'est pas suffisamment prudent pour ces matériaux.

Les publications suivantes sont jointes à sa réponse :

Honjo, Y., and Veneziano, D., 1989, « Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils », *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, n° 1, janvier.

Honjo, Y., and Veneziano, D., 1988, « Dam Filters : Physical Behavior, Probability of Malfunctioning and Design Criterion », *Takenaka Technical Research Report*, n° 40, novembre 1988.

INGLES, Owen

Owen Ingles Pty. Ltd.
R.D.E. 240
Foreshore Road
Swan Point
Tasmanie 7275

Dans sa réponse, Ingles fait des commentaires sur plusieurs aspects de la conception des filtres et de leur mise en place, concernant plus spécifiquement les filtres en présence de sols dispersifs. En se basant sur une étude de barrages en Australie, Ingles pense qu'un tiers des ruptures enregistrées peuvent être attribuées à des déficiences dans les filtres. Plusieurs de ces problèmes impliquaient des sols dispersifs.

Probable variations must be reckoned with in the base material. As the filter must cover these variations, the upper and lower limits of acceptable grain size distributions of the filter will depend on the variability of the base material. If the base material is very variable, the limits of the filters grain size distribution will be narrowed. If the variation of the base material is small, the limits of filter's grain sizes will be widened.

The filter criteria apply to adjacent zones throughout the dam. Zones with varying or narrow gradings will put stricter bounds on the grading of adjacent zones, sometimes necessitating additional zones of intermediate gradings to be placed in the dam.

The ideal filter materials for a typical moraine would be broadly graded sands and gravels without stones beyond 50-100 size. Blasted rock material with moderate contents of larger stones (< 200 mm) and fines would then normally be well suited for the transition to the adjacent coarser rockfill. ”

HONJO, Yusuke

Asian Institute of Technology
GPO Box 2754
Bangkok 10501
Thailand

Prof. Honjo, in two technical papers, suggests that broadly graded base materials with a high “ self-healing index ” (d_{95}/d_{75}) be treated with great care. The classic criteria, $D_{15}/d_{85} < 4$ or 5, is not sufficiently conservative for these materials.

The following papers are attached to his submittal :

Honjo, Y., and Veneziano, D., 1989, “ Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils ”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 1, January.

Honjo, Y., and Veneziano, D., 1988, “ Dam Filters : Physical Behavior, Probability of Malfunctioning and Design Criterion ”, *Takenaka Technical Research Report*, No. 40, November, 1988.

INGLES, Owen

Owen Ingles Pty. Ltd.
R.D.E. 240
Foreshore Road
Swan Point
Tasmania 7275

The response comments on several aspects of filter design and construction, specifically with respect to filters and dispersive soils. Based on a study of dams in Australia, Ingles believes that one-third of all failures can be attributed to filter deficiencies. Many of these problems have involved dispersive soils.

Beaucoup d'attention doit être portée au contrôle durant la construction :

« L'expérience locale démontre que, même aujourd'hui, le contrôle de la qualité est fondamentalement déterminant pour un bon comportement, et non pas la conception. Les coefficients de sécurité utilisés dans la conception semblent plutôt adéquats; ceux utilisés dans le contrôle de la qualité ne le sont pas. Pour les barrages en remblai, où la moindre déficience dans la qualité peut être fatale, j'ai toujours recommandé qu'un ingénieur (professionnel) soit présent sur le chantier de construction, à chaque heure des jours de travail, ce qui est la forme la plus économique de l'assurance qualité. »

La réponse d'Ingles incluait plusieurs publications : une sur les ruptures de barrages en Australie; une sur un essai de sol en laboratoire, qui est utile pour évaluer la dispersivité, la fissuration, le ramollissement et le relâchement en présence d'eau; et une autre portant sur le traitement pratique concernant les barrages sur sols dispersifs.

Le barrage Ben Boyd comprend un géotextile sous le tapis filtre/drain aval pour prévenir la migration des silts fins dans le filtre de texture légèrement grossière.

Les publications soumises avec la réponse sont les suivantes :

Tadanier, R., et Ingles, O. G., 1985, « Soil Security Test for Water Retaining Structures », *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, n° 3, mars.

McDonald, L. A., Stone, P. C., et Ingles, O. G., 1981, « Practical Treatments for Dams in Dispersive Soil », 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 355-360, Stockholm.

Ingles, O. G., 1984; « A Short Study of Dam Failures in Australia, 1857-1983 », *Civ. Engng. Syst.*, Vol. 1, juin.

JANSEN, Robert B.

Consulting Civil Engineer

509 Briar Road

Bellingham, Washington 98225

États-Unis

Jansen énumère plusieurs références qui, selon lui, donnent un bon aperçu de la conception des filtres. Celles-ci comprennent des publications de John Lowe, Harry Cedergren, Stan Wilson, Victor de Mello, ainsi que les manuels de l'US COE et de l'USBR. Il ajoute les différentes publications de Sherard sur des sujets « controversés » concernant les filtres de protection des matériaux à granulométrie étalée.

Pour la conception et la construction des filtres, Jansen attire l'attention sur des considérations pratiques, telles qu'un contrôle très strict de la granulométrie et de la mise en place de façon à réduire au minimum le potentiel de ségrégation. Dans certains cas, une réduction de la capacité des filtres et des drains résultait du choix de matériaux susceptibles de se détériorer à long terme.

Jansen poursuit avec les commentaires suivants :

« D'un point de vue général, il est nécessaire d'insister sur le fait que les matériaux entrant dans la composition d'un remblai sont hétérogènes jusqu'à un certain point, même si des efforts considérables sont faits pour assurer un certain

Great emphasis must be attached to construction control :

“ Experience here teaches that still to day quality control is the ultimate determinant of success or failure, not design. The safety factors in design seem to be quite adequate; those in quality control are not. For earth dams, where the slightest lapse in quality can be fatal, I have long recommended that the cheapest form of quality assurance is a professional engineer on the site, on the job, every hour of the working day. ”

The response includes several papers : one on dam failures in Australia; one on a soil security laboratory test which is useful in evaluating dispersivity, cracking, softening and slaking in the presence of water; and one on practical treatment for dams on dispersive soil.

The Ben Boyd dam utilized a geofabric below the downstream filter/drain blanket to prevent piping of fine silts into the slightly coarse filter.

Papers submitted with the response include :

Tadanier, R., and Ingles, O. G., 1985, “ Soil Security Test for Water Retaining Structures ”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, March.

McDonald, L. A., Stone, P. C., and Ingles, O. G., 1981, “ Practical Treatments for Dams in Dispersive Soil ”, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 355-360, Stockholm.

Ingles, O. G., 1984, “ A Short Study of Dam Failures in Australia, 1857-1983 ”, *Civ. Engng Syst.*, Vol. 1, June.

JANSEN, Robert B.

Consulting Civil Engineer
509 Briar Road
Bellingham, Washington 98225
USA

Several references are listed by Jansen which he believes present good overviews for filter design. These include material authored by John Lowe, Harry Cedergren, Stan Wilson, Victor de Mello and the US COE and USBR manuals He includes the various papers written by Sherard on filters to protect broadly-graded materials under “ controversial ” issues.

In designing and constructing filters, Jansen would focus on practical considerations such as strict control of gradation and placement so as to minimize segregation. In some cases, reduction in the capability of filters and drains has resulted from the selection of materials that were susceptible to deterioration over the long term.

Jansen comments as follows :

“ As a general view, there needs to be emphasis on the reality that materials used in embankment construction are heterogeneous to some extent even when considerable attempt is made to ensure a degree of uniformity. Effort should be

degré d'uniformité. On devrait s'efforcer de ne pas trop se fier à la précision supposée du processus de détermination d'un filtre. Toute analyse nécessite des hypothèses sur les capacités d'un matériau, même si on dispose d'essais effectués sur des échantillons supposés représentatifs. Il est courant d'admettre que les matériaux dans une zone donnée sont exactement ce que révèlent les essais, alors que ceux-ci reflètent approximativement les conditions locales. Les matériaux dans la nature sont inévitablement variables et peuvent être sujets à la ségrégation et à l'altération. Le colmatage peut résulter de la migration des fines, du dépôt de produits chimiques contenus dans l'eau de percolation, de la détérioration ou la recimentation des matériaux des zones adjacentes, ou du développement d'organismes.

On doit aussi attirer l'attention sur la nécessité d'une capacité d'écoulement adéquate dans le système filtre/drain. Si la composition d'un filtre est assez fine pour résister à l'érosion interne, elle n'est, par contre, souvent pas assez grossière pour permettre un drainage adéquat. La capacité de drainer est alors assurée par des tuyaux entourés d'un filtre ou par les gros éléments du filtre d'origine. La conception du filtre doit être suffisamment prudente pour assurer l'élimination de concentrations de pressions interstitielles excessives.

En assurant sa fonction de recevoir et retenir les matériaux en migration, le filtre aval peut devenir une barrière essentielle à l'eau qui s'échappe de la partie affectée du barrage. La ligne de défense vitale se déplace ainsi vers l'aval et devient un mince élément imperméable. Je crois que ceci est un très bon argument en faveur de la redondance dans la conception. Plus spécifiquement, cela ne favorise pas l'élimination du filtre amont. Les arguments qui ont été avancés contre l'usage d'un matériau de remplissage de fissures contre la face amont du noyau m'apparaissent faibles en général. Si la vitesse d'écoulement dans une fissure est tellement lente que le sable n'y pénètre pas, sa présence ne pose pas un si grave problème de toute façon. Si le sable en pénétrant maintient la fissure ouverte au point d'en empêcher la fermeture par gonflement, le résultat en sera probablement une fissure bien comblée, ce qui n'est pas un problème en soi. Bien que le filtre amont puisse compliquer la construction, sa valeur comme ligne de défense devrait avoir plus de poids que tout souci concernant les coûts ou la gestion d'un contrat.

Les annexes du bulletin en cours de préparation renferment plusieurs références sur les restrictions spécifiées concernant la teneur en fines des filtres. Il semble y avoir une sorte de consensus en faveur d'une limite de 5 % passant le tamis n° 200. Cela s'appliquerait au matériau mis en place dans le barrage, tout en reconnaissant la possibilité de contamination durant le transport, la mise en place et le compactage. Les idées sur cette limite varient entre 2 et 7 %, ce qui semble être une variation entre le souhaitable et l'inacceptable. Considérant les difficultés d'obtenir un produit de qualité durant la construction même avec un contrôle très strict, la quantité spécifiée en fines doit être limitée dans toute la mesure du possible. »

Jansen ajoute la note d'avertissement suivante concernant l'utilisation de tuyaux collecteurs drainants :

« Je crois qu'il est nécessaire d'attirer l'attention sur les problèmes potentiels associés aux tuyaux de drainage enterrés profondément dans ou sous les remblais. Nous savons que de tels drains peuvent être difficiles à surveiller, entretenir et

made to avoid too much reliance on the presumed accuracy of filter determinations. Any analysis requires assumption of material capabilities, even after thorough testing of supposedly representative samples. A rather common assumption, that only approximates field conditions, is that the materials in a given zone are consistently as indicated by testing. Natural materials are inevitably variable and may be susceptible to segregation and adulteration. Clogging can result from migration of fines, deposition of chemicals in the seeping water, deterioration or recementation of the zone materials, or organic growth.

Emphasis also has to be placed on the need for adequate hydraulic conveyance capacity of the filter/drain system. By themselves, filter aggregates fine enough to resist internal erosion are usually not coarse enough to meet the discharge requirement. The necessary capacity is ensured by filter-protected pipes or the coarse element of a graded filter. Designs have to be conservative so that excessive water pressure concentrations are prevented.

In serving its function to receive and hold migrating materials, a downstream filter may become the essential water barrier in the affected part of the dam. The vital defense line is thus moved downstream to a thin impervious element. I believe that this is a strong argument for redundancy in design. Specifically, it would not favor the elimination of the upstream filter. The arguments that have been offered against the use of a crack filler at the upstream face of the core appear to me to be generally weak. If the velocity in a crack is so low that sand would not enter, there may not be much of a problem anyhow. If penetrating sand held the crack open so as to prevent its closure by swelling, the result would likely be a tight crack that constituted no problem. Although the upstream filter may make construction a little more difficult, its value as an important line of defense should weigh more heavily than concerns about cost or contract administration.

The appendices of the draft bulletin contain several references to specification limitations on the fine content of filters. There appears to be something of a consensus in favor of a limit of 5 percent passing the No. 200 sieve. This should apply to material in place in the dam, recognizing the possibility of contamination in transport, placement, and compaction. Views on the limit range from 2 percent to 7 percent, which seems to be a variation from the commendable to the objectionable. Considering the difficulties in getting quality in construction, even with the strictest of control, the specified fines should be as severely limited as practicality will allow.”

Jansen adds the following cautionary note to the use of drain pipe collectors :

“ I believe that the potential problems of drainpipes buried deeply in or under embankments do need strong emphasis. We know that such drains may be difficult to monitor, maintain, or repair unless they are of adequate diameter to enable

réparer à moins qu'ils aient un diamètre suffisant pour en permettre l'accès et y effectuer le travail. Lorsque les drains permettent un tel accès, comme dans le cas d'un drain de pied, pour examen, nettoyage, réparation, ou remplacement, il est possible de citer plusieurs cas de bon comportement. Le choix du type de tuyau devrait impliquer l'évaluation des avantages et désavantages d'un tuyau rigide par rapport à un tuyau flexible. Par exemple, même si un tuyau en tôle ondulée peut se détériorer, il a bien fonctionné dans le cas de nombreux emplacements peu profonds. Dans quelques installations, particulièrement dans le cas de vieux aménagements, nous avons constaté quelques mauvais résultats avec des drains du type tuile d'argile et de ciment à l'amiante, qui requièrent d'être manipulés délicatement et d'être bien entourés d'un coussin pour les protéger. Dans plusieurs autres cas, la durée de vie des tuyaux métalliques a été écourtée par la corrosion. Même avec un enduit ou un revêtement de mortier, un tuyau d'acier ne durera pas longtemps s'il est mis en présence d'acides ou de sulfates à forte concentration. Toutes ces considérations, qui sont familières à la profession, tendent à démontrer que les tuyaux de drainage sont plus difficiles à justifier que les drains de sable et gravier correctement protégés par des filtres. »

KENNEY, T. C.
Professor
University of Toronto
Toronto M5S 1A4
Canada

Le Professeur Kenney dans sa réponse discute des questions de stabilité interne des matériaux filtres et de ségrégation à la mise en place. Ses commentaires se présentent comme suit :

« Je suggère qu'une distinction soit faite entre (i) les filtres qui protègent les couches de drainage composées d'un matériau à grains grossiers, non cohérents et donc de nature érodable et (ii) les filtres qui protègent les zones de sol « imperméable » présentant (ordinairement) une distribution granulométrique étalée, au moins quelque peu cohérent et résistant à l'érosion, et dont la distribution granulométrique des particules pour les besoins de la conception d'un filtre demeure incertaine. Je suggère aussi que ces deux classes de filtre soient traitées séparément dans le bulletin...

En ce qui concerne la stabilité interne, je voudrais mentionner plusieurs raisons pour lesquelles je crois que le critère de conception pour le choix de profils granulométriques stables, tel que suggéré par Kenney et Lau, 1985, est prudent (c'est-à-dire du côté de la sécurité). D'abord, les conditions d'essai adoptées étaient beaucoup plus sévères que celles rencontrées normalement sur le chantier (écoulement vers le bas, grands écoulements d'eau, vibration petite mais continue). Ensuite, les matériaux testés furent préparés en mélanges homogènes, et les sols homogènes sont plus sensibles à l'instabilité interne que les mêmes sols ayant subi un tant soit peu de la ségrégation. Sous ces deux aspects, les conditions d'essai étaient plus sévères que celles rencontrées dans la pratique. Le deuxième commentaire au sujet de cette publication sur la stabilité interne est que, dans la conclusion des discussions, le critère de conception présenté dans la publication soit écarté et

some kind of access for such work. Where pipes are accessible, as in a toe drain, for examination, cleaning, repair, or replacement, many cases of satisfactory service can be cited. Selection of the type of pipe should involve the weighing of advantages and disadvantages of rigid pipe vs. flexible pipe. For example, even though corrugated steel pipe may deteriorate, it has worked well in many relatively shallow placements. In some installations, particularly in old projects, we have seen some poor results with such types as clay tile and asbestos cement, which required careful handling and bedding to avoid damage. In many other cases, the service life of metal pipes has been cut short by corrosion. Even with mortar lining and coating, steel pipe may not last long where acids or sulfates are present in high concentration. All of these considerations, with which the profession is familiar, tend to make deep drainpipes harder to justify than sand and gravel drains properly protected by filters. ”

KENNEY, T. C.
Professor
University of Toronto
Toronto M5S 1A4
Canada

Prof. Kenney discusses internal stability and segregation of filter materials in his response. He comments as follows :

“ I suggest that a distinction be drawn between (i) filters that protect drainage layers consisting of coarse-grained, non-cohesive and therefore erodible material and (ii) filters that protect zones of 'impervious' soil consisting (usually) of broadly-graded soil, at least somewhat cohesive and somewhat resistant to erosion, and whose 'particle' size distribution for purposes of filter design is uncertain. I also suggest that these two classes of filter be covered separately in the bulletin...

Concerning internal stability, I wish to point out several reasons why I believe the 'design criterion' for choosing stable gradations, suggested by Kenney and Lau, 1985, is conservative (that is, on the safe side). First, the test conditions that were used were much more severe than those usually encountered in the field (downwards flow, large fluxes of water, small but continuous vibration). Second, the materials tested were prepared as homogeneous mixes, and homogeneous soils are more susceptible to internal instability than the same soils in a somewhat segregated state. On both counts the test conditions were more severe than those usually found in practice. The second comment about this paper on 'internal stability' is that in the closure of discussions the design criterion stated in the paper is retracted and replaced by a less stringent criterion on the basis of additional tests (see pages 420-423). I point this out because, although a number of people have

remplacé par un critère moins sévère basé sur des essais additionnels (voir les pages 420-423). Je souligne ceci parce que, bien que plusieurs personnes aient pris note de la publication, seulement quelques-unes semblent avoir pris connaissance des discussions et de leur conclusion.

La ségrégation est un sujet abordé dans plusieurs chapitres de votre bulletin en cours de préparation et je vous félicite de l'attention que vous lui portez. Sous l'en-tête " Questions controversées " vous signalez l'essai au tambour rotatif que John Westland et moi-même avons utilisé, pas tant pour prédire la ségrégation, que pour étudier les processus de ségrégation. Vous trouverez ci-joint copie d'un rapport sur cette étude. A mon point de vue, les résultats les plus utiles pour les techniques de conception et de construction, et peut-être d'un plus grand intérêt pour vous, sont ceux concernant l'influence de l'eau pour réduire la ségrégation des sols granulaires... »

Le Professeur Kenney se référant à une analyse de la littérature technique effectuée par un de ses élèves fait les commentaires suivants :

« Les résultats indiquent qu'il y a un nombre significatif de barrages dans le monde où les filtres ne satisfont pas aux critères généralement acceptés pour les filtres, et pourtant ces barrages se comportent de façon satisfaisante. Une conclusion rapide en regard de ce fait est que les critères de filtre acceptés sont prudents. Une autre conclusion, plus raisonnée, est que les écoulements à travers les zones imperméables de ces barrages sont si réduits que les zones filtres n'ont même pas à agir comme filtres, de sorte que leur bon fonctionnement apparent ne peut être utilisé pour évaluer les critères de conception. »

Le Professeur Kenney a soumis les publications suivantes :

Kenney, T. C., and Lau, D., 1985, « Internal Stability of Granular Filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985. Ripley, C. F., 1986, « Discussion », *Can. Geotech. J.*, 23, 255-258. Milligan, V., 1986, « Discussion », *Can. Geotech. J.*, 23, 414-418. Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P., 1986, *Can. Geotech. J.*, 23, 418-420, Kenney, T. C., and Lau D., 1986, « Reply », *Can. Geotech. J.*, 23, 420-423.

Kenney, T. C., 1989, « Results of Segregation Tests using 1-metre and 300-mm Diameter Rotary-Drum Apparatus », Department of Civil Engineering, University of Toronto, Publication 89-07, ISBN 0-7727-7550-8, août.

KLEINER, David

Harza Engineering Company
Sears Tower
233 South Wacker Drive
Chicago, IL 60606-6392
États-Unis

De façon typique, Harza adopte des filtres de sable et gravier concassés contre des matériaux de remblai argileux imperméables, à moins qu'un matériau de bonne qualité d'origine naturelle, facile à traiter, soit disponible. Le plus souvent, ce matériau n'est pas disponible.

L'aménagement Rocky Mountain, station de transfert d'énergie par pompage, actuellement en construction dans l'État de Géorgie, États-Unis, renferme deux types de filtre, fin et grossier, tels que montré sur la Fig. B-3. La distribution

taken notice of the paper, only a few appear to have noticed the discussions and the closure...

Segregation is a topic mentioned in several sections of your draft bulletin and I commend the attention you are giving it. Under the heading ' Controversial Issues ' you refer to the rotary-drum test which John Westland and I have used, not so much to predict segregation, but to study segregation processes. There is enclosed a copy of a report on this work. In my opinion, the results that are of most value to engineering design and construction, and perhaps of most interest to you, are those dealing with the influence of water in reducing segregation of granular soils... ”

Prof. Kenney refers to a literature study of one of his students and comments as follows :

“ The results indicated that there is a significant number of dams in the world in which the filters do not satisfy generally accepted filter criteria but the dams are performing satisfactorily. A quick conclusion regarding this result is that the accepted filter criteria are conservative. A more reasoned alternative conclusion is that seepages across the impervious zones in these dams are very small, the filter zones have therefore not had to act as filters, and therefore their apparent successful performance cannot be used in evaluations of design criteria. ”

Prof. Kenney submitted the following papers :

Kenney, T. C., and Lau, D., 1985, “ Internal Stability of Granular Filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985. Ripley, C. F., 1986, “ Discussion ”, *Can. Geotech. J.*, 23, 255-258. Milligan, V., 1986, “ Discussion ”, *Can. Geotech. J.*, 23, 414-418. Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P., 1986, *Can. Geotech. J.*, 23, 418-420. Kenney, T. C., and Lau, D., 1986, “ Reply ”, *Can. Geotech. J.*, 23, 420-423.

Kenney, T. C., 1989, “ Results of Segregation Tests using 1-metre and 300-mm Diameter Rotary-Drum Apparatus ”, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Publication 89-07, ISBN 0-7727-7550-8, August.

KLEINER, David

Harza Engineering Company
Sears Tower
233 South Wacker Drive
Chicago, IL 60606-6392
USA

Typically, Harza uses processed sand and gravel filters against clayey impervious fill materials unless good quality naturally-occurring easily processed material is available. Most often, this material is not available.

The Rocky Mountain Project, a pumped storage hydroelectric project, currently under construction in the State of Georgia, USA, contains both fine and coarse filters, as shown on Fig. B-3. The gradation of the fine filter ranges from

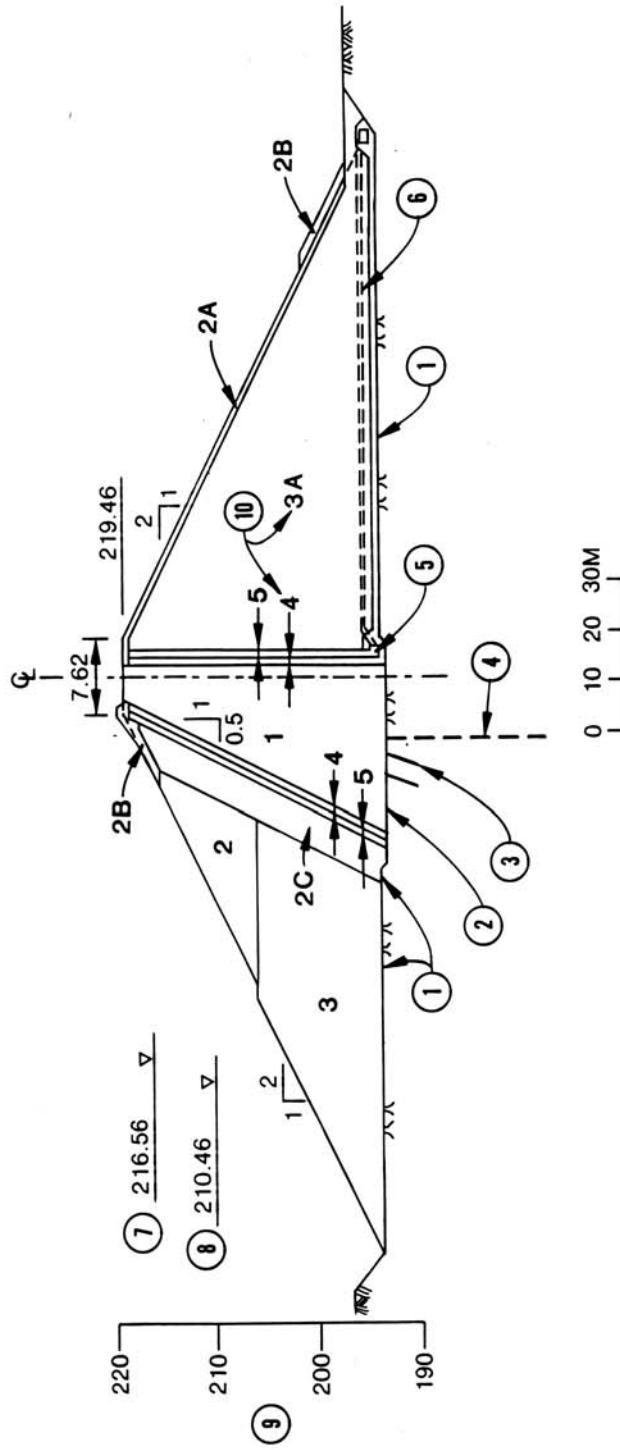


Fig. B-3

Rocky Mountain pumped storage project. Main dam, maximum cross section (Kleiner response, 1991).
Aménagement de transfert d'énergie par pompage de Rocky Mountain. Barrage principal, coupe transversale maximale (réponse de Kleiner, 1991).

- | | |
|--|---|
| (1) Top of competent weathered rock. | (1) Niveau du rocher altéré acceptable. |
| (2) Top of slightly weathered rock; surface cracks were treated and slush grout applied prior to fill placement. | (2) Niveau du rocher légèrement altéré; les fissures de surface ont été traitées et un coulis a été appliqué avant la mise en place du remblai. |
| (3) Shallow grouting to treat geologic defects. | (3) Injection peu profonde pour traiter les défauts géologiques. |
| (4) Grout curtain. | (4) Voile d'injection. |
| (5) 15 cm diameter, Schedule 80, perforated PVC drain pipe. | (5) Tuyau de drainage en PVC, perforé, de 15 cm de diamètre, classe 80. |
| (6) Finger drain. | (6) Drains en forme d'antenne. |
| (7) Maximum operating pool. | (7) Niveau maximal d'exploitation du réservoir. |
| (8) Minimum operating pool. | (8) Niveau minimal d'exploitation du réservoir. |
| (9) Elevation in meters. | (9) Cote en mètres. |
| (10) Numbering of zones in the dam. | (10) Numéro des zones dans le barrage. |

granulométrique du filtre fin s'étale de 3/4 de pouce environ comme grosseur maximale à pas plus de 5 % passant le tamis n° 200, avec approximativement 60-80 % passant le tamis n° 4. La perméabilité mesurée au laboratoire est d'environ 2×10^{-2} cm/s. Le filtre grossier, qui sert aussi de drain, s'étale d'une dimension maximale de 3 pouces à environ 10 % passant le tamis n° 4. Les deux matériaux sont fabriqués sur le site à partir d'une roche calcaire extraite d'une carrière située à proximité. La roche de carrière est concassée, tamisée, et lavée dans une usine de traitement de granulats construite sur le site spécifiquement pour produire les matériaux filtres.

Des filtres étroits, larges chacun de 2,5 pieds (75 cm), furent conçus en tenant compte du coût élevé des matériaux filtres et du fait que ces filtres sont prévus tant à l'amont qu'à l'aval du noyau. Des boîtes d'épandage sont utilisées pour mettre en place les deux zones filtres simultanément, évitant ainsi l'effet « arbre de Noël » entre les filtres. Un soin important est requis pour prévenir la contamination et autres dommages aux filtres étroits. En dépit de l'uniformité relative du filtre grossier, $C_u = 5$, il y a ségrégation des particules au-dessus de 1,5 pouce environ. La ségrégation tend à se localiser et à être « de l'épaisseur d'une pierre ». Localement, après la mise en place, il est nécessaire d'enlever à la main une mince couche des plus grosses particules. En se basant sur cette expérience, on spécifiera dans l'avenir un filtre grossier (drain) plus uniforme, peut-être avec une grosseur maximale d'environ 1,5 pouce.

Les filtres sont placés en avance sur le remblai adjacent et compactés à l'aide d'une plaque vibrante manipulée à la main, ou en effectuant deux passes d'un rouleau vibrant à tambour lisse. La densité en place des filtres n'est pas vérifiée, mais la distribution granulométrique du matériau après compactage est contrôlée d'une façon stricte.

Un tuyau de six pouces perforé, en PVC, calibre 80, est placé au bas du filtre/drain-cheminée pour diriger les eaux de percolation recueillies, vers des points d'évacuation situés au pied aval. Ces points d'évacuation consistent en des drains en forme d'antenne (finger drains) placés sous la recharge aval et composés d'un tuyau PVC, d'un filtre grossier et d'un filtre fin. Les tuyaux de drainage sont entourés d'un filtre grossier qui repose lui-même sur la roche. Aucun affaissement ou dislocation du tuyau n'est possible. Des déversoirs sont installés à la sortie des tuyaux pour mesurer les débits de fuite.

LAFLEUR, Jean
Professeur
École Polytechnique
Case postale 6079, succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7
Canada

Le Professeur Lafleur présente un commentaire approfondi sur le contenu du bulletin, comprenant des figures, une liste complète de termes, définitions et références. Un ensemble de publications techniques accompagne la réponse du Professeur Lafleur où sont consignées une partie de ses recherches ainsi que des expériences effectuées à la Baie James et sur d'autres aménagements.

about 3/4 inches maximum size to no more than 5 % passing the No. 200 sieve, with about 60-80 % passing the No. 4 sieve. Permeability, as measured in the laboratory, is about 2×10^{-2} cm/s. The coarse filter, which also serves as a drain, ranges from a top size of 3 inches to about 10 % passing the No. 4 sieve. Both materials are manufactured on site using limestone from a nearby quarry. Quarried rock is crushed, screened, and washed in an aggregate plant erected on site specifically for the manufacture of the filter materials.

Narrow filters, each 2.5 feet (75 cm) wide, were designed because of the high cost of the filter materials and because filters are used both upstream and downstream of the core. Spreader boxes are used to place the two filter zones together, thus avoiding the "Christmas tree" effect between the filters. Substantial care is needed to prevent contamination and other damage to the narrow filters. In spite of the relative uniformity of the coarse filter, $C_u = 5$, segregation of particles above about 1.5 inches occurs. The segregation tends to be local and "one stone deep". Locally, hand work is needed following placement to remove a veneer of coarser particles. Based on this experience, a more uniform coarse filter (drain) will be specified in the future, perhaps with a maximum size of about 1.5 inches.

Filters are placed ahead of adjacent fill and compacted with a hand-operated vibratory sled or with 2 passes of a vibratory smooth-drum roller. Density of the filters is not checked, but gradation of material after compaction is strictly controlled.

Six-inch perforated PVC pipe, Schedule 80, is used at the base of the chimney filter/drain system to convey collected seepage to exits at the downstream toe. These exits consist of finger drains below the downstream shell using the PVC pipe, coarse filter, and fine filter. The pipe drains are embedded in coarse filter which in turn is founded on rock. No settlement or separation of the pipe is possible. Weirs are placed at the outlets of the pipes to monitor seepage rates.

LAFLEUR, Jean
Professor
Ecole Polytechnique
Case postale 6079, succursale A
Montreal, Quebec, H3C 3A7
Canada

Prof. Lafleur presents an in-depth commentary on the bulletin content including figures and a comprehensive list of terms, definitions and references. Also included with the submittal are a group of technical papers that present some of Prof. Lafleur's work and experiences at James Bay and other projects.

Les publications soumises sont les suivantes :

- Lafleur, J. Mlynarek, J. et Rollin, A. L., 1989, « Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils », *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 115, n° 12, décembre.
- Lafleur, J., 1984, « Filter Testing of Broadly Graded Cohesionless Tills », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pages 634 à 643.
- Paré, J. J., Ares, R., Cabot, L., et Garzon, M., 1982, « Large Scale Permeability and Filter Tests at LG 3 », Q. 55, R. 7, *14^e Congrès des Grands Barrages*, Rio de Janeiro.
- Paré, J. J., et Konrad, J. M., 1982, « Discussion 1981 Filter Test Results at LG 3 », *14^e Congrès des Grands Barrages*, Rio de Janeiro.
- Paré, J. J., Boncompain, B., Konrad, J., et Verma, N. S., 1982, « Embankment Compaction and Quality Control at James Bay Hydroelectric Development », *Transportation Research Record 897*, Washington, D.C.
- Lafleur, J., et Mlynarek, J., 1991, Discussion on « Critical Filters for Impervious Soils », paper by J. L. Sherard and L. P. Dunnigan, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, discussion in Vol. 117, N° 5, pages 837 et 838.
- Paré, J. J. et Verma, N. S., 1987, « Geotechnical Practice in Hydro Electric Projects in Canada », *Canadian Engineering Centennial*, Montréal, mai.

LOWE, John

Consulting Engineer

26 Grandview Blvd.

Yonkers, New York 10710

États-Unis

L'opinion de John Lowe sur la conception des filtres est exprimée dans le texte. *Advanced Dam Engineering*, pages 270-275. Ce qui suit est tiré de sa réponse :

« Fondamentalement, les filtres devraient avoir une granulométrie étroite pour se prémunir contre la ségrégation et assurer un maximum de perméabilité. De plus, la capacité d'autofiltration du matériau à protéger doit être vérifiée. Me référant aux critères standards de Terzaghi pour les filtres, je propose. ... qu'un matériau ne soit pas considéré autofiltrant si la pente de la courbe granulométrique est plus douce que 15 % divisée par 4 ou 5 fois le changement dans la granulométrie. J'ai présenté ce concept lors d'une discussion verbale à la 5^e Conférence Panaméricaine de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, tenue à Buenos Aires en 1975. Je l'ai présenté de nouveau dans ma "Nabor Carrillo Lecture" en 1978 et dans ma "Second USCOLD Lecture" en 1982. Récemment, les essais effectués par Kenney et Lau, présentés dans leur publication "Internal Stability of Granular Filters", *Revue Canadienne de Géotechnique*, Vol. 22, pages 215-225, 1985, indiquent qu'un matériau n'est pas autofiltrant si la pente de la courbe granulométrique est plus douce que 22 % divisée par 4. ... Pour les filtres de granulométrie étroite, l'autofiltration n'est pas un problème. Cependant, le compactage d'un matériau ayant une distribution granulométrique étalée est important parce que, dans un état de faible densité, il pourrait ne pas être autofiltrant, alors qu'il le serait dans un état bien compact.

The papers submitted include the following :

- Lafleur, J., Mlynarek, J., and Rollin, A. L., 1989, "Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 12, December.
- Lafleur, J., 1984, "Filter Testing of Broadly Graded Cohesionless Tills", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 634-643.
- Pare, J. J., Ares, R., Cabot, L., and Garzon, M., 1982, "Large Scale Permeability and Filter Tests at LG 3", Q. 55, R. 7, *14th Congress on Large Dams*, Rio de Janeiro.
- Pare, J. J., and Konrad, J. M., 1982, "Discussion 1981 Filter Test Results at LG 3", *14th Congress on Large Dams*, Rio de Janeiro.
- Pare, J. J., Boncompain, B., Konrad, J., and Verma, N. S., 1982, "Embankment Compaction and Quality Control at James Bay Hydroelectric Development", *Transportation Research Record 897*, Washington, D. C.
- Lafleur, J., and Mlynarek, J., 1991, Discussion on "Critical Filters for Impervious Soils", paper by J. L. Sherard and L. P. Dunnigan, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, discussion in Vol. 117, No. 5, pp. 837-838.
- Pare, J. J., and Verma, N. S., 1987, "Geotechnical Practice in Hydro Electric Projects in Canada", *Canadian Engineering Centennial*, Montreal, May.

LOWE, John

Consulting Engineer
26 Grandview Blvd.
Yonkers, New York 10710
USA

John Lowe's opinions concerning filter design are expressed in the text, *Advanced Dam Engineering*, pp. 270-275. The following is quoted from the response.

" Basically, filters should be narrowly graded to ensure against segregation and to provide maximum permeability. Also, the self-filtering capability of the material being protected must be checked. Using the standard Terzaghi filter criteria, I proposed, ... that a material is not self-filtering if the slope of the grain size curve is flatter than 15 % divided by 4 or 5 times the change in grain size. I stated this concept in an oral discussion at the 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering held in Buenos Aires in 1975. I stated it again in my Nabor Carrillo Lecture in 1978 and in my Second USCOLD Lecture in 1982. Recently, tests by Kenney and Lau, reported in their paper " Internal Stability of Granular Filters " *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985, indicate that a material is not self-filtering if the slope of the grain size curve is flatter than 22 % divided by 4. ... For narrowly graded filters, self-filtering is not at all a problem. However, compaction of a widely graded material is important since in the loose state it may not be self-filtering, whereas in the well compacted state it may be. "

E. MANRANHA DAS NEVES

Head, Geotechnique Department
Laboratorio Nacional de Engenharia Civil
Avenida do Brasil, 101
1799 Lisbonne Codex
Portugal

La réponse de E. Maranha das Neves au questionnaire complète celle qui a été soumise antérieurement par M. Seco e Pinto et présente des résultats d'essais d'érosion interne de fissures, qui ont été exécutés au laboratoire LNEC. L'appareillage d'essai, la description des essais ainsi que les conclusions qui en découlent sont décrits dans les documents techniques suivants : E. Maranha das Neves, 1989, et E. Maranha das Neves, 1987.

Les essais d'érosion interne de fissures sont conçus pour simuler l'écoulement dans une fissure près du filtre aval d'un barrage en remblai. L'équipement d'essai permet d'analyser des fissures verticales, horizontales ou inclinées. Les essais permettent de simuler des débits d'écoulement ayant des vitesses se rapprochant de celles des débits réels dans les fissures à l'intérieur des barrages. Cette procédure diffère de celle des essais de Sherard, qui sont des essais sans érosion et pour lesquels les gradients ainsi que les vitesses d'écoulement sont élevés. Les résultats des essais confirment cependant le choix des critères granulométriques présentés par Sherard et Dunnigan, 1989.

Les essais ont aussi servi à évaluer la capacité d'un sable moyen à remplir une fissure. Ils ont démontré qu'un sable moyen uniforme $D_{100} = 0,5$ mm et $D_{15} = 0,3$ mm pénétrera facilement à l'intérieur de fissures de 2,5 et 5 mm, pour des vitesses d'écoulement aussi faibles que 1,5 cm/s.

Maranha das Neves présente également des résultats d'essais de perméabilité sur des alluvions naturelles utilisées comme matériau filtre au barrage Beliche (voir la réponse de Pedro Semaio Seco e Pinto). Les essais de perméabilité ont été effectués sur des alluvions, soit partiellement délavées de manière à réduire partiellement la quantité de fines, soit totalement délavées avec réintroduction de fines. Pour une quantité égale de fines, des perméabilités cent fois plus élevées ont été observées lorsque les fines étaient réintroduites dans les échantillons entièrement délavés. Des perméabilités de 10^{-3} cm/s ont, par exemple, été observées sur un matériau délavé et dans lequel on a introduit 7 % de fines; la perméabilité était réduite à 10^{-5} cm/s lorsque des alluvions étaient délavées de manière à réduire le pourcentage de fines à 7 %. Les essais de laboratoire doivent simuler le mode de mise en place qui était, pour ce cas particulier, un lavage avec une certaine quantité de fines restante. La perméabilité à prendre en compte est donc 10^{-5} cm/s et non pas 10^{-3} cm/s.

Maranha das Neves, E., « Analyses of Crack Erosion in Dam Cores, The Crack Erosion Test », *de Mello Volume*, pp. 284 à 298.

Maranha das Neves, E., 1987, « Discussion Report, Groundwater Effects in Geotechnical Engineering », *Proceedings*, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, septembre.

E. MARANHA DAS NEVES

Head, Geotechnique Department
Laboratorio Nacional de Engenharia Civil
Avenida do Brasil, 101
1799 Lisboa Codex
Portugal

The response by E. Maranha das Neves complements the earlier submittal by Mr. Seco e Pinto and presents the results of the crack erosion test as performed in the LNEC laboratories. The test apparatus, a description of tests conducted, and conclusions drawn are described in the technical literature, E. Maranha das Neves, 1989, and E. Maranha das Neves, 1987.

The crack erosion test is designed to simulate flow through a crack in an embankment dam to the downstream filter. The device may be positioned to study vertical, horizontal, and inclined cracks. The test allows flow to pass through the crack at velocities which approximate actual flow velocities through cracks in a dam. This is in contrast to Sherard's no erosion test in which high gradients and high flow velocities are used. The test results, however, confirm the choice of filter gradations using the criteria presented by Sherard and Dunnigan, 1989.

The test was also used to model the crack filling ability of a medium sand. The test demonstrated that a uniform medium sand, $D_{100} = 0.5$ mm and $D_{15} = 0.3$ mm, will readily move into 2.5 and 5.0 mm cracks under flow velocities in the crack as low as 1.5 cm/s.

Maranha das Neves also reports the results of permeability tests on a natural alluvium used as filter material for the Beliche Dam (see Pedro Semaio Seco e Pinto response). Permeability tests were performed on washed alluvium with fines only partially removed and on washed alluvium with fines completely removed then fines added. A comparison of results indicated permeabilities 100 times higher for specimens with the same fines content but completely washed prior to the addition of fines. For example, for 7 percent fines, permeability values of 10^{-3} cm/s were obtained for washed material with fines added whereas the washed alluvium with fines partially removed to about 7 percent yielded a permeability of 10^{-5} cm/s. Laboratory tests must simulate actual field processing conditions, in this case, washing with some fines remaining, i.e., a permeability of 10^{-5} , not 10^{-3} cm/s.

Maranha das Neves, E., "Analyses of Crack Erosion in Dam Cores, The Crack Erosion Test", *De Mello Volume*, pp. 284-298.

Maranha das Neves, E., 1987, "Discussion Report, Groundwater Effects in Geotechnical Engineering", *Proceedings*, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, September.

PATRICK, James G.
Consulting Engineer
One Baldwin Ave., no. 623
San Mateo, CA 94401
États-Unis

Selon Patrick, la ségrégation représente la plus grande difficulté de contrôle de construction, surtout au contact entre matériaux adjacents. De plus, il y a lieu d'attirer l'attention sur le fait qu'il faut être beaucoup plus rigoureux pour les filtres des noyaux inclinés.

Au barrage McNary, l'US Corps of Engineers a enlevé et remplacé une partie des matériaux filtres impropres du remblai sur la rive de l'Oregon une fois l'ouvrage terminé.

« Après la mise en place des remblais, nous avons constaté que le filtre était impropre. Nous avons creusé un tunnel à partir du pied aval jusqu'aux zones de filtres, nous avons aménagé deux déviations latérales, et enlevé et remplacé les filtres, à partir de la fondation rocheuse jusqu'à une cote qui correspondait à la ligne de percolation dans le noyau.

Sur ce même aménagement, le ruissellement de l'eau de cure du béton a montré qu'il y avait ségrégation au contact des filtres et des ouvrages en béton. Autrement dit, l'eau de cure transportait du silt du noyau à travers les filtres. »

Pendant la construction, on a observé que l'écoulement provenant des matériaux du filtre entourant un tuyau de drainage au barrage Walla Walla transportait du silt. Ce drain s'est colmaté d'une façon permanente.

PERRY, Edward
US Army Engineer WES (WESGE-R)
PO Box 631
Vicksburg, MS 39180
États-Unis

Perry a présenté des exemplaires des documents suivants :

US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986, « Soil Mechanics Note n° 1, Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters », janvier.

International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical Committee on Filters-TC7, 1987, « Report on Filters », version révisée, août.

US Department of the Army, Corps of Engineers, 1986, « Engineer Manual EM 1110-2-1901, Seepage Analysis and Control for Dams », septembre.

Le document intitulé « Engineer Manual » précise la position habituelle de l'US COE au sujet de la conception des filtres des barrages; voir l'annexe D, « Filter and Drain Design and Construction ».

Perry a également fait des commentaires sur le contenu du bulletin et sur la première et la seconde ébauches.

PATRICK, James G.
Consulting Engineer
One Baldwin Ave., no. 623
San Mateo, CA 94401
USA

Patrick comments that segregation is the most important construction control problem especially at the contacts between adjacent materials. Also, the more stringent demands on filters for sloping core dams than for central core dams should be emphasized.

At McNary dam, the US Corps of Engineers removed and replaced a portion of the incorrect filter material in the Oregon shore embankment after the embankment had been placed.

“ After the embankment had been constructed, we found that the filter was not correct. We tunnelled in from the downstream toe to the filter zones, branched in both directions, and removed and replaced the filters from rock foundation to an elevation where the seepage line would exit the core.

On that same project the runoff of concrete curing water revealed segregation at the contact of the filter zones and concrete structure. That is, the curing water was carrying the silt core material through the filters. ”

During construction, it was observed that the discharge from filter material surrounding a pipe drain at the Walla Walla Dam was carrying silt. This drain was permanently plugged.

PERRY, Edward
U.S. Army Engineer WES (WESGE-R)
PO Box 631
Vicksburg, MS 39180
USA

Perry submitted copies of the following documents :

US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986, “ Soil Mechanics Note No. 1, Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters ”, January.

International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical Committee on Filters-TC7, 1987, “ Report on Filters ”, revised draft, August.

US Department of the Army, Corps of Engineers, 1986, “ Engineer Manual EM 1110-2-1901, Seepage Analysis and Control for Dams ”, September.

The Engineer Manual provides the most current position of the US COE concerning the design of filters for dams, see Appendix D, “ Filter and Drain Design and Construction ”.

Perry also provided detailed comments on the content of the bulletin and on the first and second drafts.

POST, Georges
11, rue des Girondins
92210 St Cloud
France

Les commentaires soumis se rapportent au questionnaire avant sa diffusion. Plusieurs aspects concernent cependant le contenu du bulletin. La ségrégation lors de la mise en place est une cause majeure de difficultés; les critères granulométriques doivent être spécifiés de manière à éviter ce problème. Post suggère que le bulletin comprenne une discussion sur les critères granulométriques des filtres des puits de décompression et que des exemples d'utilisation de tuyaux perforés, dans des systèmes filtre/drain de grands barrages, soient donnés.

Les études fondamentales de Cedergren (Casagrande, Vol. 1973), Kenney et Lafleur devraient être incluses dans le bulletin. Les commentaires comportent également la table des matières du projet révisé concernant les filtres, de la SIMSTF, 1987, ainsi que la liste des membres du comité des filtres, TC7.

Plusieurs commentaires sur les rédactions successives du bulletin ont été incorporés au texte. Les commentaires suivants sont pertinents :

« A mon avis, l'utilisation de tuyaux perforés à la base d'un drain-cheminée est à éviter : il y a risque de séparation ou d'écrasement; un drain collecteur de plus grande dimension est préférable; cependant, des tuyaux perforés pourraient être acceptés pour des petits barrages, les détails étant conçus de façon adéquate (joint, résistance, allongement possible). »

« Même s'il n'y a pas de ségrégation, je ne peux accepter la présence d'une zone étroite si l'on n'utilise pas de coffrage ou de boîte d'épandage. De toute façon, il y a risque de contamination entre des zones adjacentes trop étroites. »

RIPLEY, Charles F.
5011 Hilarie Place
Victoria, British Columbia, V8Y 2A4
Canada

L'excellente documentation jointe au questionnaire inclut des figures présentées lors d'une tournée de conférences au Canada. Ces figures concernent la conception courante des filtres. Elles constituent une rétrospective de l'évolution de la conception et de l'utilisation des filtres à partir du début du XX^e siècle. Une attention particulière est portée aux filtres de sable de granulométrie uniforme pour éviter la migration des fines du noyau s'il y a fissuration.

La documentation fournie comprend plusieurs discussions présentées dans les revues suivantes : la Revue ASCE de Géotechnique, la Revue Canadienne de Géotechnique et le Congrès CIGB de 1988. Ces documents appuient les avis de Ripley au sujet de l'utilisation du sable fin dans les filtres pour prévenir l'érosion interne due au lessivage des fines du noyau adjacent.

Ripley, Charles, F., 1988, « Comments on Q. 61-R. 29 and R. 55 », *Proceedings*, XVI ICOLD, Vol. V.

POST, Georges
11, rue des Girondins
92210 St Cloud
France

Comments in the submittal pertain to the questionnaire prior to its release. Several points, however, are significant to the bulletin. Segregation during placement is a major source of problems; gradation criteria must be presented which avoid this problem. Post suggests that the bulletin include a discussion of gradation criteria for filters for relief wells and that case histories include the use of slotted pipes in filter/drain systems in large dams.

The original work of Cedergren (Casagrande Vol. 1973), Kenney, and Lafleur should be included in the bulletin. Also enclosed are a copy of the table of contents of the revised draft on filters, ISSMFE, 1987, and a list of members of the committee on filters, TC7.

Many of the review comments on the several drafts of the bulletin have been incorporated in the text. The following comments are pertinent :

“ In my opinion the use of perforated pipe at the toe of a chimney drain is not recommended : risk of disconnection or crushing, a larger longitudinal finger drain is preferable, although it may be accepted for a small dam with adequate pipe detail design (connection, strength, possible elongation). ”

“ I cannot agree that even without segregation a zone can be very narrow unless slipforming or spreader boxes are used. But in any case there is a risk of excessive contamination between too narrow adjacent zones. ”

RIPLEY, Charles F.
5011 Hilarie Place
Victoria, British Columbia, V8Y 2A4
Canada

Some excellent material is presented in this response including a series of figures on filter design practice used in a Canadian lecture tour. Evolution of filter design and use of filters is traced from the early 1900's. Strong emphasis is placed on the use of narrowly graded sand filters to prevent migration of fine particles from the core should cracking occur.

Enclosures include several discussions in the ASCE Geot. Journal, the Canadian Geot. Journal, and the 1988 ICOLD Congress. The enclosures support Ripley's views concerning the use of narrowly graded clean sand filters to prevent the piping of fines from adjacent core material.

Ripley, Charles, F., 1988, “ Comments on Q. 61 - R. 29 and R. 55 ”, *Proceedings, XVI ICOLD*, Vol. V.

- Ripley, Charles, F., 1986, « Discussion by C. F. Ripley », *ASCE Geotechnical Journal*, Vol. 112, février.
- Ripley, Charles, F., 1983, « Discussion by C. F. Ripley », *ASCE Geotechnical Journal*, Vol. 109, n° 9, septembre.
- Ripley, Charles, F., 1986, « Internal Stability of Granular Filters : Discussion », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23. Paper by Kenney, T. C. and Lau, D., 1985, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22.

SEEMEL, Richard N.

Consulting Engineer
122 Galewood Circle
San Francisco, Californie 94131
États-Unis

Cette réponse au questionnaire fournit un exemple complet concernant les filtres à Churchill Falls, avec des références pertinentes. Richard Seemel occupait le poste de Directeur des travaux – digues et ouvrages de dérivation, lors de la construction des nombreux barrages et digues à Churchill Falls.

« Pour l'aménagement de Churchill Falls (Seemel, 1972), les drains-cheminée à l'intérieur des remblais homogènes et les zones filtres des barrages et digues en enrochement ont tous été conçus avec un seul filtre de grande largeur et des matériaux à granulométrie étalée, conformément au critère de Terzaghi/Bertram (Seemel, 1973 et 1976). Les granulométries de la moraine glaciaire et du matériau de la zone 3 A filtre/drain sont illustrées par Seemel, 1976.

Après le remplissage des réservoirs en 1972, il y a eu des problèmes associés à l'érosion à l'intérieur de plusieurs barrages (Seemel, 1976), qui ont conduit à des renards. Les plus critiques ont été ceux des digues GJ-11A, FF-11 and FF-12 (Boivin, 1973; Chadwick, 1979) qui sont en enrochement et pour lesquelles ce sont les zones transitions/filtre qui posaient des problèmes. Les dommages à la digue GJ-11A sont montrés sur la Fig. B-4 (Boivin, 1973). Ces problèmes sont décrits dans les références. La digue GJ-11A a été excavée et examinée par un comité spécial dont faisait partie feu G. E. Bertram, un expert en filtres de grand renom, et a été reconstruite le long de l'axe originel. Les noyaux des digues FF-11 et FF-12 ont été injectés pour remplir les vides résultant de l'érosion interne (Jones, 1982), d'abord en 1978 et ultérieurement en 1985.

La seconde étape d'injection de remblai avait pour objectif de combler des sections de barrages (désignées sous le nom de « fenêtres ») qui n'avaient pas été injectées en 1978 à cause de la venue de l'hiver du Labrador. Avant le programme d'injection de 1978, des venues occasionnelles d'eau turbide provenant de la digue FF-11 (410 m de longueur et 21 m de hauteur) ont atteint un débit mesuré de 106 l/s. L'écoulement est maintenant stabilisé à environ 2 l/s. Des observations similaires ont été faites et un traitement a été appliqué localement dans plusieurs petites sections de la digue FF-12, de plus d'un mile de longueur. Il y a 46 grands barrages ou digues avec drain-cheminée qui comportaient des filtres de granulométrie comparable, mais de configuration différente; il n'y a pas eu de problèmes significatifs avec ces filtres ou drains.

- Ripley, Charles, F., 1986, "Discussion by C. F. Ripley", *ASCE Geotechnical Journal*, Vol. 112, February.
- Ripley, Charles, F., 1983, "Discussion by C. F. Ripley", *ASCE Geotechnical Journal*, Vol. 109, No. 9, September.
- Ripley, Charles, F., 1986, "Internal Stability of Granular Filters: Discussion", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23. Paper by Kenney, T. C., and Lau, D., 1985, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22.

SEEMEL, Richard N.

Consulting Engineer
122 Galewood Circle
San Francisco, California 94131
USA

The response provides a complete case history of the filters at Churchill Falls with pertinent references. Richard Seemel held the position of Construction Manager - Dykes and Diversion during the construction of the many dams and dykes at Churchill Falls.

" The Churchill Falls Project (Seemel 1972) chimney drains in the homogeneous fills and the filter zones in rockfill dams and dikes were all designed with a single filter of substantial width and broad gradation sized according to the Terzaghi/Bertram criterion (Seemel 1973 and 1976). Gradations of the glacial till and of the zone 3A filter/drain are illustrated by Seemel, 1976.

Subsequent to filling the reservoirs in 1972, there were problems associated with internal erosion in a number of dams (Seemel 1976) which resulted in sinkholes. The most serious of these were GJ-11A, FF-11 and FF-12 (Boivin 1973, Chadwick 1979) which were rockfills having problems with transitions/filter zones. Damage to dyke GJ-11A is shown in Fig. B-4 (Boivin, 1973). These problems are documented in the references. GJ-11A was dismantled and studied by a special review board including the late G. E. Bertram, a well-known filter expert, and then was rebuilt along the original design lines. The core zones of FF-11 and FF-12 were grouted to refill voids caused by piping (Jones 1982) first in 1978 and again in 1985.

The second round of embankment grouting was to block sections of the dams (referred to as " windows ") which were left ungrouted in 1978 due to the onset of the Labrador winter. Prior to grouting in 1978, occasional surges of turbid water from the 410 m long by 21 m high FF-11 reached a measured flow of 106 l/s. Seepage is now stabilized at about 2 l/s. FF-12, over a mile long, has a similar history in several short reaches. There are 46 large homogeneous dams and dikes with chimney drains which were of similar filter gradation but of different configurations on the project; there have been no major problems with these filters/drains.

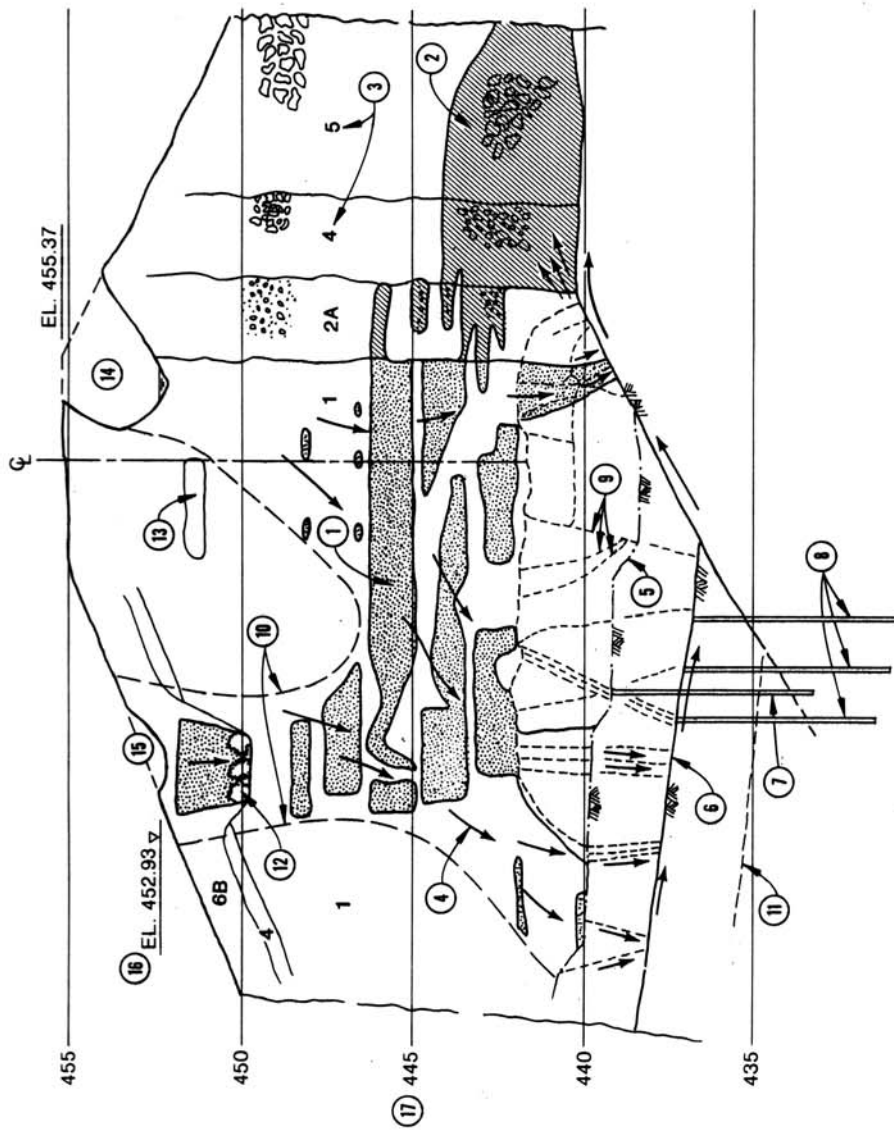


Fig. B-4

Churchill Falls. Dyke GJ-11 A incident (Seemel response, 1991).
Churchill Falls. Incident sur la digue GJ-11 A (réponse de Seemel, 1991).

Note : The figure is a pictorial representation of the deterioration process at Sta. 15 + 07.

Note : La figure représente le phénomène de détérioration au chaînage 15 + 07.

- | | |
|---|--|
| (1) Granular material as mapped at Sta. 15 + 07 during the field investigation. | (1) <i>Matériau granulaire cartographié au chaînage 15 + 07 pendant les travaux de reconnaissances.</i> |
| (2) Granular material choked with fines from glacial till. | (2) <i>Matériau granulaire colmaté par les fines de la moraine glaciaire.</i> |
| (3) Numbering of zones in the dam.
Zone 1 Glacial till < 30 cm
Zone 2 A Crushed sand and gravel
Zone 4 Rock spalls < 30 cm
Zone 5 Rockfill < 1.3 meters
Zone 6 B Riprap | (3) <i>Numéro des zones dans le barrage.
Zone 1 Moraine glaciaire < 30 cm
Zone 2 A Sable et gravier concassés
Zone 4 Éclats de roche < 30 cm
Zone 5 Enrochement < 1,3 mètre
Zone 6 B Riprap.</i> |
| (4) Arrows depict the assumed path of migrating material. | (4) <i>Flèches indiquant la migration supposée des particules.</i> |
| (5) Original foundation excavated to this level. | (5) <i>Fondation initiale excavée à ce niveau.</i> |
| (6) Final foundation excavated to this level. | (6) <i>Fondation finale excavée à ce niveau.</i> |
| (7) Original grout curtain, 20-50 feet deep, single row. | (7) <i>Voile d'injection initial, 20 à 50 pieds de profondeur, une ligne.</i> |
| (8) Final grout curtain, 20-50 feet deep, three rows. | (8) <i>Voile d'injection final, 20 à 50 pieds de profondeur, trois lignes.</i> |
| (9) Open joints partially filled with clay, sand, and grout; note that jointed geologic structure of rock knob at Sta. 15 + 10 is projected to Sta. 15 + 07. | (9) <i>Fissures ouvertes remplies partiellement d'argile, de sable et de coulis; à noter que la structure géologique diaclasée de la protubérance rocheuse au chaînage 15 + 10 est projetée au chaînage 15 + 07.</i> |
| (10) Outside limit of disturbed material. | (10) <i>Limite extérieure du matériau remanié.</i> |
| (11) Sub-horizontal joint. | (11) <i>Joint sub-horizontale.</i> |
| (12) Collapsed riprap. | (12) <i>Riprap effondré.</i> |
| (13) Layer of frozen till. | (13) <i>Couche de moraine gelée.</i> |
| (14) Downstream sinkhole, muddy water at base of sinkhole. | (14) <i>Trou d'affaissement en aval, eau boueuse au fond du trou d'affaissement.</i> |
| (15) Upstream sinkhole. | (15) <i>Trou d'affaissement en amont.</i> |
| (16) Maximum reservoir level. | (16) <i>Niveau maximal du réservoir.</i> |
| (17) Elevation in meters. | (17) <i>Cote en mètres.</i> |

Sherard (1979), lorsqu'il évalue des sols tels que la moraine à Churchill (Sherard, 1979), et d'autres experts (Jansen 1979, Burke 1979) insistent sur la nécessité d'éviter toute ségrégation dans les filtres juxtaposés aux noyaux de moraine. Feu H. H. Burke était étroitement impliqué dans la conception des remblais de Churchill Falls.

Le problème de fond à Churchill était inhérent à la « constructibilité » des filtres. A cause de la granulométrie étalée des matériaux, ainsi que des dimensions des particules qui pouvaient avoir jusqu'à 3,5 pouces (9 cm) et 6 pouces (15 cm), il était impossible d'éviter une certaine ségrégation lors de la mise en place. Ceci, et l'importance d'une uniformité à travers la zone n'ont pas été bien compris jusqu'à ce que des anomalies apparaissent plus tard. Ces filtres ont été construits selon les meilleures normes, en tenant compte des méthodes de construction possibles. Il y a eu néanmoins érosion interne dans la moraine glaciaire.

La mise en place de filtres de sable adjacents au noyau a été considérée à l'étape de conception du projet Churchill à la fin des années 1960, mais on a pensé que ceci était une exigence inutile en raison des restrictions du budget de construction. Ultérieurement, pour des projets tels que celui de la Baie James où les moraines sont très semblables, des filtres de sable adjacents aux noyaux ont été mis en place d'une façon courante pour l'assurance de la qualité. »

Seemel, R. N., and Brochu, B., 1972, « Dikes and Water Control Structures for Churchill Falls », *Transactions*, American Power Conference, Volume 34, Chicago.

Seemel, R. N., and Boivin, R., 1973, « The Churchill Falls Power Development : Design of the Dykes », CANCOLD Annual Meeting, Quebec City, septembre.

Boivin, R., and Seemel, R. N., 1973, « The Churchill Falls Power Development : Construction of the Dykes », CANCOLD Annual Meeting, Quebec City, septembre.

Seemel, R. N., and Colwell, C. N., 1976, « Drainage Provisions and Leakage Investigations of Churchill Falls Dams and Dykes », *Transactions*, Vol. II, XII ICOLD, Mexico City, avril.

Sherard, J. L., 1979, « Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils, Question 49 », *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, novembre.

Jansen, R. B., 1979, – General Report on Question 49 : Deterioration or Failures of Dams », *Transactions*, Vol. IV, XIII ICOLD, New Delhi, novembre.

Chadwick, W. L., 1979, « Technical Sessions (n° 18), Question 49, Problems of Embankments », *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, novembre.

Burke, H. H., 1979, « Technical Sessions (n° 29), Question 49, Problems of Embankments », *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, novembre.

Jones, M. C., and Fox, R. C., 1982, « Remedial Drilling and Grouting of Two Rockfill Dykes at Churchill Falls », CANCOLD Annual Meeting, Montréal, septembre.

La réponse inclut les commentaires suivants concernant la construction des filtres granulaires :

« En ce qui concerne les zones de transition et les drains-cheminée dans les barrages en remblai, leur “ constructibilité ” nécessite une attention particulière lors

Sherard, in his paper discussing soils such as the glacial till at Churchill (Sherard 1979), and subsequent comments (Jansen 1979, Burke 1979) emphasize the need to avoid segregation of filter zones adjacent to the till cores. The late H. H. Burke was closely involved in the design process for the Churchill Falls embankments.

The underlying problem at Churchill was the inherent lack of constructibility of the filters. Because of their broad gradation and 3 1/2 and 6 inch maximum size particles, it was not possible to construct them without some degree of segregation. This fact, and the criticality of positive uniformity across the zone was not fully appreciated until problems arose later. These filters were constructed to the best standards possible within the capability of the construction methods. Nevertheless, they permitted piping of the glacial till.

Use of sand filters next to the core was considered during the design process for Churchill in the late 1960's but was thought to be an unnecessary refinement in view of the limited construction budget. Later projects such as James Bay with very similar tills routinely have separate sand filter placed next to the core as a matter of quality assurance. ”

Seemel, R. N., and Brochu, B., 1972, “ Dikes and Water Control Structures for Churchill Falls ”, *Transactions*, American Power Conference, Volume 34, Chicago.

Seemel, R. N., and Boivin, R., 1973, “ The Churchill Falls Power Development : Design of the Dykes ”, CANCEL Annual Meeting, Quebec City, September.

Boivin, R., and Seemel, R. N., 1973, “ The Churchill Falls Power Development : Construction of the Dykes ”, CANCEL Annual Meeting, Quebec City, September.

Seemel, R. N., and Colwell, C. N., 1976, “ Drainage Provisions and Leakage Investigations of Churchill Falls Dams and Dykes ”, *Transactions*, Vol. II, XII ICOLD, Mexico City, April.

Sherard, J. L., 1979, “ Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils, Question 49 ”, *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, November.

Jansen, R. B., 1979, “ General Report on Question 49 : Deterioration or Failures of Dams ”, *Transactions*, Vol. IV, XIII ICOLD, New Delhi, November.

Chadwick, W. L., 1979, “ Technical Sessions (No. 18), Questions 49, Problems of Embankments ”, *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, November.

Burke, H. H., 1979, “ Technical Sessions (No. 29), Question 49, Problems of Embankments ”, *Transactions*, Vol. V, XIII ICOLD, New Delhi, November.

Jones, M. C., and Fox, R. C., 1982, “ Remedial Drilling and Grouting of Two Rockfill Dykes at Churchill Falls ”, CANCEL Annual Meeting, Montreal, September.

In addition, the response provides the following comments concerning the construction of granular filters :

“ Speaking of transition zones and chimneys in embankment dams, ‘ constructibility ’ requires careful consideration during design of such elements as

de la conception, en particulier pour la largeur des zones, l'épaisseur des tapis, l'aspect général et la géométrie des zones, la granulométrie ainsi que les méthodes de mise en place. La "constructibilité" peut être définie comme une partie intégrante de la conception de l'ouvrage, qui permet de construire l'ouvrage avec des méthodes de construction pratiques et réalistes.

En ce qui concerne la ségrégation dans les zones filtrées, il n'y en aurait pas à la mise en place si, à la limite, les particules d'une même zone étaient de dimension unique. On en déduit que plus l'enveloppe granulométrique est serrée, moins il y a risque de ségrégation. De telles restrictions granulométriques impliquent nécessairement plusieurs zones. S'il n'y a pas de ségrégation, une zone peut cependant être très étroite, ce qui signifie des économies de fourniture de matériaux coûteux.

Comme règle approximative, la largeur des zones verticales ou inclinées peut être réduite jusqu'à un mètre. Le gaspillage important de matériaux dans une zone étroite placée en couches, dû à des effets du type « arbre de Noël » ou « pagode », peut conduire à l'utilisation de coffrages ou de boîtes d'épandage pour maintenir la largeur minimale et la géométrie requise. Pour mieux contrôler ce remblai superflu (pour des couches de 25 cm et une largeur minimale de un mètre, et des pentes de chaque côté de 1 : 1, les pertes sont d'environ 20 %), on a tendance, en Amérique du Nord, à spécifier des prix unitaires dans les contrats et à payer les quantités calculées à partir des limites théoriques, obligeant ainsi l'entrepreneur à prendre à sa charge le coût des pertes. Il est cependant plus pratique de payer pour les pertes inévitables; ceci a pour effet d'améliorer la qualité des travaux.

Plus une zone est large, moins une ségrégation fortuite, une contamination ou d'autres anomalies, seront des critères restrictifs, et moins les pertes influenceront les dimensions du matériel de criblage ou des autres installations requises pour la construction.

Pour assurer leur intégrité, les tapis "horizontaux" devront avoir au moins 0,5 m d'épaisseur et devront être mis en place en deux levées ou plus. Leur continuité est primordiale. On peut prévenir la formation de vides dans les couches au contact des appuis en exigeant à chaque levée du remblai que des matériaux soient placés et compactés à l'avance contre les appuis. Les zones "verticales" devraient être élargies au contact des appuis.

Les zones de transition prévues pour la protection des noyaux ne sont habituellement pas verticales parce qu'elles suivent les faces inclinées du noyau. Il y a cependant des cas pour lesquels les drains-cheminée sont verticaux, ce qui facilite la construction. Ceci est à éviter toutefois parce qu'il peut y avoir des tassements différentiels et un effet voûte au-dessus des vides.

Il arrive fréquemment que les surfaces des zones étroites soient contaminées par d'autres matériaux et que la surface d'une levée doive être nettoyée avant la mise en place de la levée suivante. Les spécifications de construction devront exiger de l'entrepreneur qu'il maintienne une équipe réduite d'ouvriers munis de pelles, ceux-ci ayant pour tâche d'effectuer des rondes de surveillance continue aux emplacements critiques et ce, à chaque poste de travail. Ces ouvriers seront chargés d'éliminer toute contamination accidentelle et de s'assurer que la largeur de la zone est respectée, de même que l'intégrité du contact aux appuis.

width of zones, thickness of blankets, aspect and geometry of zones, gradation and placement. 'Constructibility' can be defined as the characteristic of a design feature which permits it to be built by practical field methods as a part of the completed structure.

Regarding segregation in filter zones, as an extreme, there could be no segregation in placement if a zone consisted of only single size particles, and it follows, the more restricted the gradation envelope, the less chance there is of segregation. But restricting the particle sizes leads to the need for multiple zones. However, without segregation, a zone can be very narrow, leading to economies in the supply of expensive materials.

As a rule of thumb, zones might be as narrow as one meter in a sloped or near vertical zone. The high percentage waste in a narrow zone placed in lifts, due to the "christmas tree" or "pagoda" effect, may lead to slipforming or use of spreader boxes to maintain the effective minimum width and appropriate geometry." In an attempt to control wastage (a 25 cm lift with a minimum surface width of one meter and side slopes of 1 : 1 leads to about 20 % waste), in North America, there is a tendency to write contracts paid under unit prices for only neat line quantities and force the contractor to underwrite the cost of wastage. However, a more practical approach leading to better quality work is to pay directly for unavoidable waste.

The wider a zone is, the less chance there is of incidental segregation, or contamination, or other defects, becoming a controlling factor, and the less effect waste has on sizing gravel plants and other construction facilities.

To maintain integrity, 'horizontal' blankets should be at least 1/2 meter thick and should be placed in a minimum of two lifts. Continuity is of first importance. Voids in blankets at abutment contacts can be prevented by requiring the actual contact of each lift to consist of a thicker fillet to be rolled up against the abutment at an angle. 'Vertical' zones should be widened at the abutment contact.

Transition zones protecting a core are not actually vertical since they follow the sloping core face. There have been cases of truly vertical chimney drains which, while verticality facilitates construction, should not be allowed because of possible unequal settlement and bridging over voids.

Contamination of the surfaces of narrow zones with other materials is commonplace in actual construction and lift surfaces require cleaning on a regular basis, prior to placement of the next lift. Specifications should require the contractor to provide a small crew of laborers with shovels to patrol critical zones continuously every working shift. These men should be charged with removing incidental contamination and maintaining the required zone width as well as the integrity of the abutment contact.

L'inspection de chaque levée doit être obligatoire et doit être approuvée par le surveillant de travaux avant la mise en place de la levée suivante. Les malfaçons sur ces levées devront être photographiées immédiatement. Une seconde photographie démontrant que les travaux correctifs ont été exécutés devra précéder la reprise de la mise en place du remblai. Au moins un contrôle granulométrique fait au hasard, après compactage, devra être requis à chaque poste de travail.

SIERRA, Jesus Maria
Independent Consultant
Avenida el Dorado n° 100-57
Bogota
Colombie

Cette réponse au questionnaire discute de l'utilisation des critères et des spécifications pour les filtres des barrages en enrochement avec masque amont en béton. Les détails des filtres au barrage Salvajina sont présentés et discutés. La réponse est accompagnée de plusieurs références.

Le barrage Salvajina est un barrage en gravier-enrochement avec masque en béton, de 148 m de hauteur. Il est situé en Colombie et fut terminé en 1985. Il comporte des zones qui font fonction de filtres de la façon suivante :

- 1) Un filtre bi-couche recouvre une partie de la fondation du barrage.
- 2) Une autre zone sert de drain-cheminée pour collecter toute eau de percolation s'écoulant à travers le masque en béton et le remblai amont.

L'utilisation de filtres recouvrant la fondation d'un barrage en enrochement à masque en béton, dans la zone adjacente au masque en béton où il y a des matériaux à grains fins et érodables, est primordiale, à cause des gradients élevés entre le réservoir, à l'amont du masque, et la surface de la fondation à l'aval. A cet endroit, il y a des pertes de charge très élevées sur de courtes distances. La réponse provenant de Colombie discute également de l'importance de cet aspect.

A Salvajina, on retrouve des sols résiduels, produits d'altération d'une diorite, sur la partie supérieure de l'appui en rive droite. Ce matériau est un sable silteux de faible plasticité et susceptible de pénétrer facilement à l'intérieur du gravier grossier ou de l'enrochement. Ce matériau a été protégé avec un filtre de sable à béton, recouvert par le filtre qui supporte la dalle de béton. Cet ensemble de filtre bi-couche laisse l'eau s'écouler au travers du sol résiduel sans risque de pénétration des fines dans la fondation de la dalle de pied. L'eau qui percole au travers du double filtre s'écoule dans le remblai de gravier qui a une perméabilité considérablement plus élevée que celle du filtre.

A cause de la présence de fines dans le remblai du barrage, on a décidé d'incorporer une zone filtre constituée de matériaux grossiers à l'intérieur du barrage. Ce filtre sert de drain-cheminée et collecte les fuites à travers le masque amont en béton. Le drain-cheminée amène l'eau à la base du barrage, assurant de ce fait un rabattement important de la nappe d'eau dans le corps du remblai.

La réponse attire l'attention sur la suggestion de Sherard que le filtre placé sous le masque en béton devrait être constitué de particules de 3 pouces (7,6 cm) de dimension maximale, avec 35 à 55 % passant le tamis n° 4. L'adoption de cette zone

Inspection of every lift must be absolute and each lift must have approval by the inspector prior to placement of the next lift. Defective lifts should be photographed immediately and the construction record cleared only when a second photograph is recorded showing the completed corrective work. Material testing for proper gradation after compaction should occur at least once each working shift on a random basis. ”

SIERRA, Jesus Maria
Independent Consultant
Avenida el Dorado No. 100-57
Bogota, Colombia

The response discusses the uses, criteria and requirements of filters in concrete-faced rockfill dams. Details of the Salvajina Dam filters are listed and discussed. Several references are provided.

Salvajina Dam, a 148 m high concrete face gravel-rockfill dam, completed in Colombia in 1985, included zones which had the functions of filters :

- 1) A two-layer filter zone covered a portion of the foundation of the dam.
- 2) And another zone was used as a chimney drain to collect any water seeping through the concrete face and upstream dam fill.

The use of filters to cover the foundation of a CFRD in the area adjacent to the concrete face, where fine-grained erodible materials are present, is extremely important because of the high gradients between the reservoir, upstream of the concrete toe slab, and the foundation surface downstream. High head loss over short paths exists at these locations. Note that the response from Colombia also discusses the importance of this.

At Salvajina, residual soil from the weathering of diorite was present at the upper portion of the right abutment. The material was a low plasticity silty sand, easily erodible into coarse gravel or rockfill. The material was protected with a concrete sand filter overlain by the filter that supports the concrete face slab. This two layer filter system permits the passage of water through the residual soil and prevents piping of fines through the foundation of the toe slab. Water seeping through the foundation and passing through the two filters drains into the gravel fill, which has a permeability significantly higher than the filter.

Because of the fines content of much of the dam fill, it was decided to provide a coarse filter zone within the dam to act as a chimney drain to collect any water leaking through the concrete face. The chimney conveys water to the bottom of the dam, thereby assuring a low phreatic line within the body of the dam.

The response calls attention to Sherard’s suggestion that the filter underlying the concrete face should preferably consist of particles with a maximum size of 3 inches with 35-55 percent passing the No. 4 sieve. The adoption of this zone would

nécessiterait souvent plusieurs filtres entre la dalle et l'enrochement grossier. Il faut noter que cette suggestion se rapproche de l'usage consistant à utiliser un triple filtre entre un noyau et une recharge en enrochement déversé, tel qu'on le pratiquait dans les barrages avec noyau incliné, il y a quarante ou cinquante ans (voir par exemple, la discussion concernant le barrage Nantahala dans le rapport principal).

Un tableau indiquant la granulométrie du sol résiduel en question ainsi que celle des filtres accompagne le document.

ISSMFE Committee on Filters, 1987, Revised Draft of the Report on Filters, août.

Sierra, J. M., Ramirez, C. A., and Hacelas, J. E., 1985, « Design Features of Salvajina Dam, Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance », Edited by J. Barry Cooke and James L. Sherard. Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers, in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan, octobre.

Hacelas, J. E., Ramirez, C. A., and Regalado, G., « Construction and Performance of Salvajina Dam », same publication of Ref. 2, pp. 286 à 315.

Sierra, J. M., 1989, « Concrete Face Rockfill Dam Foundations », *de Mello Volume*, pp. 423 à 446, Editora Edgar Blucher Ltda., São Paulo-S.P., Brésil.

Sherard, J. L., « The Upstream Zone in Concrete Face Rockfill Dams », same publication of Ref. 2 : pp. 618 à 641.

SOWERS, George

Senior Consultant, Law Companies Group, Inc.
112 Townpark Drive
Kennesaw, Géorgie 30144
États-Unis

Sowers suggère d'ajouter deux sujets :

« Conception en fonction de la constructibilité » et « Facteurs à considérer pour la largeur des filtres » au chapitre III.

Sowers formule ce qui suit :

« D'après mon expérience en tant qu'ingénieur-conseil chargé de vérifier la conception et examiner la construction, j'ai souvent constaté que la conception était incompatible avec la « constructibilité ». Le concepteur ne définit pas le filtre de manière à optimiser les coûts de construction; il arrive souvent que l'entrepreneur décide de redéfinir les filtres en fonction de ses méthodes de construction.

L'épaisseur minimale théorique d'un filtre devrait correspondre à ce qui est requis pour assurer l'écoulement de l'eau au travers d'un matériau de granulométrie spécifiée. La possibilité de colmatage par des fines, la stabilité interne et l'expérience du concepteur en matière de construction sont, dans le fond, ce sur quoi on devra se baser pour fixer l'épaisseur d'un filtre.

require, in many cases, the necessity of multiple filters between the face slab and the coarse rockfill. Note that this suggestion is not far different from the practice of using a 3-stage filter between the core and the dumped rockfill shell in sloping core dams of 40 and 50 years ago (see discussion of Nantahala Dam in body of main report, for example).

A table listing the gradation of the residual soil and the various filters is included in the submittal.

ISSMFE Committee on Filters, 1987, Revised Draft of the Report on Filters, August.

Sierra, J. M., Ramirez, C. A., and Hacelas, J. E., 1985, "Design Features of Salvajina Dam, Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance", edited by J. Barry Cooke and James L. Sherard. Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers, in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan, October.

Hacelas, J. E., Ramirez, C. A., and Regalado, G., "Construction and Performance of Salvajina Dam", same publication of Ref. 2, pp. 286-315.

Sierra, J. M., 1989, "Concrete Face Rockfill Dam Foundations", *de Mello Volume*, pp. 423-446, Editora Edgar Blucher Ltda., Sao Paulo-S.P., Brasil.

Sherard, J. L., "The Upstream Zone in Concrete Face Rockfill Dams", same publication of Ref. 2; pp. 618-641.

SOWERS, George

Senior Consultant, Law Companies Group, Inc.
112 Townpark Drive
Kennesaw, Georgia 30144
USA

Sowers suggests the addition of two items to the outline :

"Design for Constructability" and "Factors involved in Filter Thickness" to Sect. III.

Sowers states :

"In my experience as a Board of Consultants member in reviewing designs and observing construction, I have seen that the designs are sometimes not compatible with constructability. The designer does not configure filter so that it can be economically constructed and the contractor sometimes unilaterally re-configures the filter to suit his procedures.

Theoretically for filtration the minimum thickness would be that required to assure water passage through the specified assortment of particle sizes. In reality, gut feelings based on assumed potential for clogging with fines, internal stability and the designer's experience with constructability are more likely to control the filter thickness."

TALBOT, James R.
National Soil/Design Engineer
Soil Conservation Service
PO Box 2890
Washington, DC 20013
États-Unis

La réponse au questionnaire a été préparée en mai 1993; elle présente des commentaires sur le troisième projet de rédaction :

« Je remarque que le Dr. Edward Perry vous a envoyé le document de l'US Soil Conservation Service (SCS), intitulé « Soil Mechanics Note n° 1, Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters ». Ce guide a été préparé et publié d'après les résultats du programme très élaboré d'essais sur filtres granulaires pour les barrages en remblai. Ce programme d'essais a été établi en collaboration avec feu le Dr. James Sherard. Vous avez inclus le tableau des critères du guide, ce qui est correct. En plus du tableau, une note donne dix étapes expliquant comment concevoir un filtre. L'étape 10 fournit plusieurs renseignements utiles que je vous recommanderais d'inclure. L'étape 10 indique que, pour certains sols, les limites granulométriques ainsi définies pour le filtre permettraient l'utilisation d'un sol à granulométrie discontinue. En conséquence, il est requis de spécifier une plage étroite pour éviter toute discontinuité granulométrique.

Après six années d'utilisation, le SCS a décidé d'apporter quelques précisions et de les inclure dans le SCS National Engineering Handbook. Nous croyons qu'il est important d'utiliser des matériaux granulaires relativement uniformes et de s'assurer que des matériaux comportant des discontinuités granulométriques ne sont pas utilisés. La rédaction finale de notre guide est presque terminée. Il spécifie que pour les limites du filtre du côté grossier et du côté fin, le coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10}) ne dépasse pas six. La plage doit être suffisamment étroite de manière à ce que le rapport entre la dimension maximale et la dimension minimale des particules soit égal ou inférieur à 5, pour tous les pourcentages passant de 60 ou moins. La plage étroite délimitant un matériau à granulométrie uniforme peut se situer n'importe où entre les limites définies par les critères.

De plus, veuillez ajouter un autre sujet aux conclusions (à la page 10, troisième projet de rédaction) de notre étude.

On n'a pas trouvé de rapport ou de corrélation entre D_{50} et d_{50} ou entre D_{15} et d_{15} , pour le comportement des filtres. Les critères antérieurs utilisant les rapports D_{50}/d_{50} ou D_{15}/d_{15} devraient être abandonnés. L'exigence du rapport D_{15}/d_{15} égal à quatre ou plus assure une perméabilité adéquate d'un filtre, mais n'est pas nécessaire pour définir les propriétés de ce filtre. »

THANIKACHALAM, V.
Program Executive
TTTI
Madras, 600113
Inde

V. Thanikachalam a adressé plusieurs publications techniques dont il est l'auteur ou coauteur. Il a fait parvenir également une copie de sa thèse de doctorat.

TALBOT, James R.
National Soil/Design Engineer
Soil Conservation Service
PO Box 2890
Washington, DC 20013
USA

The following response was prepared May, 1993; it presents comments on the third draft :

“ I note that Dr. Edward Perry has sent you the Soil Conservation Service (SCS), “ Soil Mechanics Note No. 1, Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters.” This guide was prepared and published as a result of the extensive study SCS made of granular filters for embankment dams with the late Dr. James Sherard. You have included the table of criteria from the guide which is good. Besides the table, the note contains 10 steps explaining how to design a filter. Step 10 gives some valuable information which I would like you to include. Step 10 indicates that for some soils, the filter gradation limits obtained using the criteria can be rather broad so as to allow the use of skip-graded or gap-graded filters, and that a narrow band should be specified within the broad limits to prevent this.

After using our guide for six years, SCS has decided to make some refinements and insert it into the SCS National Engineering Handbook. We believe it is important to use relatively uniform granular materials and to ensure gap or skip graded materials are not used. The final draft of our revised guide is in the last stages of preparation. It includes requirements that the coarse and fine sides of the specified filter band have a coefficient of uniformity (D_{60}/D_{10}) of six or less. Also, the filter band must be narrow such that the ratio of maximum particle size to minimum particle size is five or less at all percent passing values of 60 or less. The narrow band defining uniformly graded material may be located anywhere within the broad limits defined by the criteria.

In addition, please add another item to the other conclusions (on page 10, third draft) for our study.

No relationship or correlation was found between D_{50} and d_{50} or between D_{15} and d_{15} for filter performance. Previous filter criteria employing D_{50}/d_{50} or D_{15}/d_{15} relationships should be abandoned. Requirements of D_{15}/d_{15} equal to four or more are good for ensuring adequate permeability of the filter, but are not needed for defining filter properties.”

THANIKACHALAM, V.
Program Executive
TTTI
Madras, 600113
India

Thanikachalam sent several technical papers which he authored or co-authored. He also sent a copy of his doctoral thesis. These documents outline

Ces documents font ressortir l'évolution de la conception des filtres et présente les résultats des essais de filtre exécutés à l'Université de Madras. La liste des documents envoyés est donnée ci-après :

- Thanikachalam, V., 1975, « Studies on the Design of Protective Filters for Earthen Structures », PhD thesis, U. of Madras.
- Thanikachalam, V., et al., 1972, « A Critical Reappraisal of the Design Criteria for Filters », CSIR Project, College of Eng., Madras.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1973, « Design of Filter Thickness Based on the Application of Queueing Theory », *Journal of Hydraulic Research*.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1974, « Grain Size Criteria for Protective Filters – An Enquiry », Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Sakthivadivel, R., et al., 1972, « Head-Loss Theories Infiltration », *Journal AWWA*, avril.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1975, « Design of Protective Filters for Cohesive Soils », 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., « Piping Mechanism of Cohesive Soils – A theory and Verification », IGS Conference on Geotechnical Engineering, 1978.

VICK, Steven G.

PO Box 643
Indian Hills, Colorado 80454
États-Unis

Vick est actuellement Président de l'USCOLD Committee on Tailings Dams (Comité USCOLD des barrages de stériles miniers et industriels). Il mentionne que le colmatage chimique ou biologique des filtres et des drains est fréquent dans les barrages de stériles miniers. Ce phénomène, bien que plus prononcé dans ce dernier type de barrage, est aussi un problème dans les barrages en remblai. Jansen fait aussi cette remarque dans sa réponse. Vick signale que le Professeur Abadjiev de Bulgarie a présenté un projet de document au Comité CIGB des barrages de stériles miniers et industriels intitulé « Filtres et drains pour barrages de stériles – Recommendations sur la conception », voir la réponse d'Abadjiev.

the evolution of filter design and present the results of filter testing performed at the University of Madras. A list of the documents sent follows :

- Thanikachalam, V., 1975, " Studies on the Design of Protective Filters for Earthen Structures " PhD thesis, U. of Madras.
- Thanikachalam, V., et al., 1972, " A Critical Reappraisal of the Design Criteria for Filters ", CSIR Project, College of Eng., Madras.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1973, " Design of Filter Thickness Based on the Application of Queueing Theory ", *Journal of Hydraulic Research*.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1974, " Grain Size Criteria for Protective Filters – An Enquiry ", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Sakthivadivel, R., et al., 1972, " Head-Loss Theories Infiltration ", *Journal AWWA*, April.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., 1975, " Design of Protective Filters for Cohesive Soils ", 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng.
- Thanikachalam, V., and Sakthivadivel, R., " Piping Mechanism of Cohesive Soils – A Theory and Verification ", IGS Conference on Geotechnical Engineering, 1978.

VICK, Steven G.

PO Box 643
Indian Hills, Colorado 80454
USA

Vick is currently the Chairman of the USCOLD Committee on Tailings Dams. He indicates that chemical and biological plugging of filters and drains often occurs in tailings dams. This difficulty, although more pronounced in tailings dams, is a problem for embankment dams as well. Jansen also remarked on this in his response. Vick stated that Prof. Abadjiev of Bulgaria has submitted a draft document to the ICOLD Tailings Dam Committee entitled " Filters and Drains for Tailings Dams – Design Recommendations ", see Abadjiev response.

RÉPONSES PROVENANT DES ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

CALIFORNIE

Vernon H. Persson, Chief
Division of Safety of Dams
Department of Water Resources
1416 Ninth Street, PO Box 942836
Sacramento, California, 94236-0001

La réponse présente des commentaires détaillés sur le questionnaire :

La lettre indique : « Dans le domaine des barrages en terre, les variations de niveau des réservoirs dans l'ouest (des États-Unis) empêchent souvent la formation de nappes phréatiques dans les remblais, telle que prévu lors de la conception. L'utilisation du comportement de ces barrages comme précédents pour la conception des filtres, la stabilité ou autres considérations peut être dangereuse. »

A) Évolution de la conception des filtres et de leur mise en place

« Nous avons passé en revue les coupes transversales types des barrages construits sur une série d'années pour déterminer s'il y a une évolution identifiable dans la conception et la construction des filtres en Californie. Il y a eu une évolution générale, mais nous n'avons pas trouvé les étapes bien définies mises en relief par Charles Ripley pour vous. Nous avons plutôt découvert des barrages jusqu'à 200 pieds de hauteur, dont la construction remonte au milieu des années 50, présentant un noyau central large ou une zone imperméable amont, avec des matériaux plus grossiers dans le reste du barrage. Aucune zone de transition, ni amont ni aval, n'avait été prévue. Il n'y a eu aucun problème de renard dans ces barrages, mais de hautes nappes phréatiques sont apparues là où les matériaux grossiers contenaient des fines ou s'étaient effrités lors du compactage.

Dans les barrages où des zones de transition furent prévues pour la première fois, les spécifications demandaient des sables et graviers de lits de rivière. Quelquefois, une dimension maximale était spécifiée. Il y avait à l'époque une réserve abondante de sables et graviers de lits de rivière de haute qualité en Californie – plusieurs de ces matériaux avaient été lavés pour en extraire l'or.

La récente tendance, poussée par les économies possibles, préconise des zones de filtre et de drain étroites. Un contrôle strict de construction donne des résultats acceptables. Les barrages Red Mountain et Ramona, présentés par Creegan, en sont des bons exemples. Les boîtes d'épandage et, dans le cas de drains-cheminée composés d'un matériau unique, un rehaussement du remblai de cinq pieds pour y effectuer une tranchée de réception ont été efficaces. Le compactage, la contamination et la ségrégation sont à considérer. Le compactage est important pour prévenir le tassement qui peut causer un effet de voûte et la création de vides, dans les

RESPONSES FROM STATES OF THE UNITED STATES OF AMERICA

CALIFORNIA

Vernon H. Persson, Chief
Division of Safety of Dams
Department of Water Resources
1416 Ninth Street, PO Box 942836
Sacramento, California, 94236-0001

The response provides detailed comments on the questionnaire :

The cover letter observes “ In the area of earth dams, reservoir fluctuations in the West (western United States) often prevent development of design phreatic lines in embankments. Using performance of these dams as precedents for filter design, stability or other considerations can be dangerous. ”

A) Evolution of Filter Design and Construction

“ We reviewed cross sections of dams constructed over a number of years to determine if there was an identifiable evolution of filter design and construction in California. There was a general evolution but we did not find the well-defined steps that Charley Ripley outlined for you. Rather, we found dams up 200 feet high being constructed as late as the mid-1950s with either a wide central core or upstream impervious zone with coarser materials in the remainder of the dam. No transition zones were provided. There have been no piping problems in these dams, but high phreatic lines have developed in dams where the coarser materials contained fines or broke down during compaction.

In dams where transition zones were first provided, the specifications generally called for streambed sands and gravels. Sometimes a maximum size was specified. There was once an abundant supply of high quality streambed sands and gravels in California-many of them washed to obtain gold.

A current trend, driven by economics, is for thin filter and drain zones. Close construction control is producing acceptable results. Red Mountain and Ramona Dams already discussed by Creegan, are typical examples. Spreader boxes and in the case of single material chimney drains, overbuilding five feet and trenching have been effective. Compaction, contamination and segregation are all concerns. Compaction is important to prevent settlement caused bridging, hence voids, in the narrow zones. Sled compactors working on 12-inch lifts produce good results. Contamination (migration of base fines) that is acceptable on the edges of wider

zones étroites. Les plaques vibrantes « Sled compactors » travaillant sur des levées de 12 pouces donnent de bons résultats. La contamination (migration des particules fines), qui est acceptable sur la bordure des zones plus larges, diminuerait de façon significative l'efficacité des zones étroites. Étant donné qu'il n'est pas possible de retravailler les matériaux présentant une ségrégation dans des espaces étroits, des distributions granulométriques plus uniformes sont utilisées.

Nous et les concepteurs de deux barrages de dimension moyenne, construits durant les cinq dernières années, avons dû nous satisfaire de zones de transition en gravier dont la granulométrie n'était pas aussi étalée que prévu. A titre d'exemple, les spécifications ne renfermaient que des limites granulométriques réparties sur quatre dimensions de tamis. Les entrepreneurs se sont servis d'installations mobiles de criblage pour produire des matériaux de granulométrie presque uniforme – qui ont ensuite été mélangés en juste proportion pour satisfaire aux spécifications. Il n'y avait pas de particules fines au-dessous de la plus petite dimension de tamis malgré le fait que les concepteurs avaient envisagé un matériau de bonne granulométrie dont la pente de la courbe granulométrique était continue de haut en bas. Nous avons été informés que des modifications majeures aux installations de traitement seraient nécessaires pour effectuer plus qu'un écrêtage des particules hors dimension, produire des graviers de dimensions quasi uniformes et recueillir le résidu de sables et de fines qui était utilisé ailleurs. Si ceci devient un fait général, c'est une autre raison pour concevoir des filtres et des drains de granulométrie uniforme ou dépendant des coûts, pour resserrer les spécifications afin de s'assurer d'un matériau de bonne granulométrie comme prévu par le concepteur.

Il existe une pression croissante pour l'utilisation de tuyaux et de géotextiles dans les drains filtres au lieu de matériaux granulaires plus chers comparativement. »

B) Spécifications de conception et pratiques de construction

« La feuille jointe A, qui est un extrait de “ Guidelines for the Design and Construction of Small Embankment Dams ”, renferme nos critères déjà publiés sur les filtres granulaires. Ce sont des lignes directrices, publiées pour la première fois en 1977, et qui ne sont pas des normes rigides. Chaque cas est évalué séparément.

Depuis plusieurs années, nous n'avons pas prescrit des filtres plus fins que le sable à béton pour satisfaire au critère D_{15}/d_{15} plus petit que 40. Autrement dit, les essais de l'US Soil Conservation Service/Sherard avec boue nous inquiètent. Comme mentionné ci-dessus, les zones étroites ne permettent pas l'autofiltration dans le filtre par migration des fines provenant du matériau de base, ce qui est permis dans quelques-uns de ces essais.

Différentes méthodes ont été utilisées pour vérifier la stabilité interne du matériau de base ces dernières années. La méthode de Lowe est souvent employée.

Harry Cedergren, qui travaillait dans la Division au cours des années 60, nous apprenait à évaluer la capacité spécifique des drains plutôt qu'à compter sur des rapports D_{15}/d_{15} .

Nous exigeons couramment la présence de zones de filtres granulaires pour arrêter les fissures causées par les secousses sismiques. Au moins 1 % des barrages

zones would significantly decrease the capacity of these narrow zones. Since reworking of segregated material is not possible in the confined spaces, more uniform gradations are being used.

We and the designers of two moderate-sized dams constructed in the last five years have had to contend with gravel-size transition zones which were not as well-graded as anticipated. For example, the specifications only contained gradation limits on four sieve sizes. The contractors used portable screening plants that produced nearly uniformly-graded materials-which were blended to just meet the specifications. There were no fines below the smallest sieve size even though the designers had envisioned a well-graded material extending down the slope of the gradation curve. We were told that major changes would be required in the plants to do more than scalp over-sized material, produce the nearly uniform gravel sizes and collect the remaining blend of sands and fines which were used elsewhere. If this is generally true, it represents another reason to design uniform filters and drains or depending on costs, tighten the specifications to insure a well-graded material as envisioned by the designer.

There is growing pressure to use pipes and geofabrics in filter drains in place of more expensive granular material.”

B) Design Requirements and Construction Practices

“ Attachment A, an excerpt from ‘ Guidelines for the Design and Construction of Small Embankment Dams ’, contains our only published criteria on granular filters. They are guidelines, originally published in 1977, and are not rigid standards. Each condition is evaluated separately.

We have not required filters finer than concrete sand to meet the D_{15} to d_{15} less than 40 criterion for several years. On the other hand the Soil Conservation Service/Sherard tests with slurry trouble us. As mentioned above, narrow zones do not permit self-filtration in the filter by migration of fines from the base which was allowed in some of those tests.

Various methods have been used to check the internal stability of the base material in the last few years. Lowe’s method is currently being used.

Harry Cedergren, who was employed in the Division in the 1960s, taught us to make dam specific drain capacity assessments rather than to rely on D_{15} to d_{15} ratios.

We routinely require granular filter crack stopper zones for earthquake considerations. At least one percent of California’s dams are across or very near

de Californie sont situés sur ou très près de failles actives ou potentiellement actives. De plus, le tremblement de terre de Loma Prieta, survenu le 17 octobre 1989, confirme la tendance des barrages en remblai à développer des fissures transversales lors des tassements survenant durant ou après les secousses sismiques. Bien que les remblais zonés, comme le barrage Cedar Springs, soient préférés, nous acceptons sur certains barrages munis de filtres/drains-cheminée la présence d'un seul matériau (stopper) pour arrêter la propagation des fissures.

Nous limitons habituellement l'usage de tuyaux dans les barrages en remblai à la zone extérieure en aval d'une ligne, de pente 1,5 h/1 v, tracée vers l'aval à partir de l'intersection du talus amont du remblai et du niveau normal du réservoir. Notre inquiétude est que les défauts du tuyau, la surcharge, sa détérioration ou un tassement différentiel du remblai puissent créer un vide important dans le remblai qui causerait une rupture par renard.

Nous limitons l'usage de géotextiles aux endroits où ils peuvent être remplacés facilement. »

Liste des références

- Leps, T. M., 1989, « The Influence of Possible Fault Offsets on Dam Design », *Water Power and Dam Construction*, Avril, pp. 36 à 43.
- Sherard, J. L., Cluff, L. S., and Allen, C. R., 1974, « Potentially Active Faults in Dam Foundations », *Geotechnique* 24, n° 3, pp. 367 à 428.

C) Exemples

« Le barrage Eureka Lake est discuté dans la note B jointe. Le problème de la présence d'un tapis drainant au contact d'un remblai existant avec une risberme stabilisatrice ajoutée n'est pas limité à ce barrage. Nous pouvons en mentionner quatre dans les quinze dernières années. Les raisons mentionnées pour expliquer l'écoulement des eaux de percolation par-dessus les risbermes non perméables comprenaient :

- Le matériau du filtre/drain contenait trop de fines;
- La quantité des infiltrations sortant sur le parement aval fut sous-estimée;
- Le filtre/drain n'avait pas été construit selon l'épaisseur spécifiée.

L'instabilité interne du remblai peut avoir été un facteur qui n'avait pas été détecté lors des incidents antérieurs. »

D) Points de vue controversés

« L'exemple mentionné ci-dessus et le problème général que nous avons eu en ajoutant des risbermes non perméables sur le parement aval des remblais met en lumière un sérieux problème potentiel associé à la présence de zones imperméables, comportant une instabilité interne, dans les barrages. Les filtres de sable, dont la granulométrie a été conçue pour prévenir la migration des fines provenant

active to potentially active faults. Also the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake confirmed the tendency of embankment dams to develop transverse cracks as they settle during and after earthquakes. While zoned embankments, like Cedar Springs Dam, are preferred, we are accepting single material crack stopper chimney filter-drains on some dams.

We currently restrict the use of pipes in dam embankments to outside a 1.5 h to 1 v line drawn downstream from the intersection of the upstream embankment slope and the normal reservoir surface. Our concern is that pipe defects, pipe overload, pipe deterioration, foundation offset or differential embankment settlement could open a major void in an embankment that would cause a piping failure.

We are restricting the use of geotextiles to areas where they can readily be replaced.”

List of references

- Leps, T. M., 1989, “ The Influence of Possible Fault Offsets on Dam Design ”, *Water Power and Dam Construction*, April, pp. 36-43.
- Sherard, J. L., Cluff, L. S., and Allen, C. R., 1974, “ Potentially Active Faults in Dam Foundations ”, *Geotechnique* 24, No. 3, pp. 367-428.

C) Case Histories

“ Eureka Lake Dam is discussed in Attachment B. The problem of a drain blanket between an existing embankment and an added stability berm is not unique to that dam. We can recall four in the last 15 years. Reasons given for seepage flowing over nonpervious berms have included :

- The filter-drain material contained excess fines;
- The amount of seepage exiting the downstream face was underestimated;
- The filter-drain was not constructed to the specified thickness.

Internal instability of the embankment may have been a factor that was not detected in the earlier incidents.”

D) Controversial

“ The above-mentioned case history and the more general problem we have had with adding non-pervious berms to the downstream faces of embankments highlights a potentially serious problem in dealing with internally unstable impervious zones in dams. The sand filters that are graded to prevent fines from migrating from the impervious zone cause clogging on the upstream side of the

de la zone imperméable, causent un colmatage du côté amont du filtre. Cette zone colmatée devient l'élément le plus imperméable dans le remblai et provoque la charge d'eau totale du réservoir immédiatement à l'amont du filtre. Si le filtre n'est pas convenablement lesté, des glissements peuvent en résulter. Donc, la pratique normalement suffisante d'utiliser des filtres en sable dans les barrages en remblai peut ne pas assurer la sécurité dans toutes les conditions et les sols présentant une instabilité interne peuvent ne pas être tolérés dans tous les barrages. »

Note A jointe

« Lorsqu'un matériau drainant est requis, dans la plupart des cas ce sera un matériau concassé acheté à un fournisseur de granulats. L'emprunt provenant d'un dépôt de surface est généralement trop sale. Le fuseau granulométrique suivant, qui correspond à celui spécifié pour le granulat à béton de 1,5 pouce dans la section 90-3.04 des Spécifications de janvier 1977, publiées par le Département des Transports de l'État de Californie, a donné des résultats satisfaisants :

Dimension du tamis	Pourcentage passant
1-1/2	90-100
3/4	45-75
4	30-45
50	4-10
100	1-3
200	0-2

Cependant, le matériau drainant doit, en plus, satisfaire aux critères suivants :

- 1) $\frac{D_{15} \text{ du drain}}{d_{15} \text{ du matériau adjacent}} = 5 \text{ à } 40$
- 2) $\frac{D_{15} \text{ du drain}}{d_{85} \text{ du matériau adjacent}} = 5 \text{ ou moins}$
- 3) $\frac{D_{85} \text{ du drain}}{\text{Diamètre du trou d'un tuyau perforé}} = 2 \text{ ou plus}$

Des drains de pied avec tuyau de drainage incorporé sont souvent installés le long du pied aval des barrages en association avec un tapis drainant, dans le but de recevoir les eaux de fuite provenant de la fondation et du remblai. Des tuyaux de drainage sont aussi utilisés en d'autres points pour contrôler les percolations, comme sous les revêtements des évacuateurs de crue.

Pour des raisons de corrosion ou de résistance, seuls les types de tuyau de drainage suivants sont autorisés : en béton, ciment à l'amiante, argile cuite et plastique (PVC).

La largeur minimale en crête du remblai sera de 12 pieds. La revanche minimale est de 4 pieds. »

filter. The clog becomes the most impervious element in the embankment and causes full reservoir head immediately upstream of the filter. If the filter is not adequately ballasted, slides will be triggered. Therefore, the usually sufficient practice of using sand filters in embankment dams may not be safe in all conditions and internally unstable soils may not be tolerated in all dams.”

Attachment A

“ Where drain material is required, in most cases it will have to be a processed material purchased from an aggregate supplier. Pit run borrow is usually too dirty. The following gradation, which conforms to the 1 1/2-inch concrete aggregate specified in Section 90-3.04 of January 1988 Standard Specifications, California State Department of Transportation, has given satisfactory results :

Sieve Size	Percentage Passing
1-1/2	90-100
3/4	45-75
4	30-45
50	4-10
100	1-3
200	0-2

However, the suitability of the drain material must meet the following criteria :

- 1) $\frac{D_{15} \text{ of the drain}}{d_{15} \text{ of the adjacent material}} = 5 \text{ to } 40$
- 2) $\frac{D_{15} \text{ of the drain}}{d_{85} \text{ of the adjacent material}} = 5 \text{ or less}$
- 3) $\frac{D_{85} \text{ of the drain}}{\text{Diameter of hole in perforated pipe}} = 2 \text{ or more}$

Toe drains incorporating a drain pipe are often installed along the downstream toe of dams in conjunction with a drainage blanket, for the purpose of collecting seepage waters from the foundation and embankment. Drain pipes are also used at other locations for controlling seepage, such as under spillway linings.

Because of corrosion and strength considerations, the following are the only types of drainpipes allowed : concrete, asbestos cement, clay, and plastic (PVC).

The minimum embankment crest width shall be 12 feet. The minimum freeboard is 4 feet.”

Note B jointe

Barrage Eureka Lake
Donald H. Babbitt
14 août 1991

« En 1968, le barrage Eureka Lake fut réparé pour assurer le contrôle des eaux de percolation et en améliorer la stabilité. Les réparations comprenaient :

- Excavation du parement aval selon une pente de 2 : 1 et pénétrant dans la fondation pour créer une tranchée longitudinale de 10 pieds de profondeur;
- Mise en place d'un tapis drainant de 2 pieds d'épaisseur jusqu'à une hauteur de 16 pieds sur le talus excavé;
- Construction d'une risberme stabilisatrice de 10 pieds de largeur à l'aval du tapis drainant.

Un tuyau collecteur perforé, en argile cuite, de 6 pouces, fut placé à la base du drain. Des tuyaux ascendants furent installés pour raccorder le collecteur aux zones du talus où il y avait des concentrations de fuites.

Le barrage de 27 pieds de hauteur, situé à la cote 6 200 pieds dans les montagnes du Sierra Nevada et à 90 miles au nord-est de Sacramento, fut construit en 1866 pour accroître la capacité d'un lac naturel. Le remblai ainsi que sa fondation peu profonde sont tous deux constitués d'un matériau morainique (consistant en un matériau à granulométrie étalée, caractéristique d'une moraine glaciaire). La risberme est formée du même matériau que le remblai originel.

Apparemment, la réparation fut efficace durant un an. Une tournée d'inspection à l'automne 1970 permit de découvrir que de l'eau s'échappait du barrage au sommet de la risberme stabilisatrice et que le débit mesuré à la sortie des tuyaux de drainage était passé de 60 gpm à 40 gpm. Le stockage d'eau dans le réservoir est demeuré restreint depuis. Une tranchée de reconnaissances fut exécutée en 1988 au travers du drain, au sommet, et permit de découvrir qu'il n'y avait pas d'écoulement dans le remblai vers le drain. Une accumulation de particules fines s'était formée à l'amont du drain. Apparemment, le matériau du remblai, de granulométrie étalée, présente une instabilité interne. »

COLORADO

Jeris Danielson, State Engineer
Division of Water Resources
1313 Sherman Street, Room 818
Denver, Colorado 80203
États-Unis

L'État du Colorado a soumis des commentaires détaillés dans sa réponse au questionnaire. De façon traditionnelle, les critères établis par Terzaghi, l'USBR et le COE ont été utilisés pour l'étude et l'approbation de la conception des filtres pour les barrages. Plus récemment, l'État accorde une préférence aux critères SCS basés sur les études de Sherard et les études SCS en laboratoire.

On mentionne la récente publication du SCS sur les filtres, Soils Mechanics Note n° 1, et celle de l'USBR, Embankment Dams Design Standards, Protective

Attachment B

Eureka Lake Dam
Donald H. Babbitt
August 14, 1991

“ In 1968, Eureka Lake Dam was repaired to control seepage and improve embankment stability. The repairs included :

- Excavating the downstream face on a 2 : 1 slope, and continuing to a 10-foot deep longitudinal trench into the foundation;
- Placing a 2-foot thick, 16-foot high drain blanket on the excavated slope;
- Constructing a 10-foot wide stability berm downstream of the drain blanket.

A perforated clay collector pipe (6”) was placed at the base of the drain. Risers were installed from it to areas on the slope that had concentrated seepage.

The 27-foot high dam, located at El. 6200 feet in the Sierra Nevada Mountains, 90 miles northeast of Sacramento, was constructed in 1866 to enlarge a natural lake. The embankment and shallow foundation are both “ glacial drift ” (consisting of broadly graded material typical of glacial till). The berm was constructed of the same material as the original embankment.

The repair was apparently effective for one year. An inspection in the summer of 1970 disclosed that water was emerging from the dam at the top of the stability berm and that the flow from the drainage pipes had decreased from 60 gpm to 40 gpm. Reservoir storage has been restricted since that time. In 1988, an exploration trench across the top of the drain disclosed that seepage was not flowing into the drain from the embankment. A clog of fines had formed on the upstream side of the drain. Apparently, the broadly graded embankment material is internally unstable. ”

COLORADO

Jeris Danielson, State Engineer
Division of Water Resources
1313 Sherman Street, Room 818
Denver, Colorado 80203
USA

The State of Colorado submitted detailed comments in response to the questionnaire. Traditionally, the criteria presented by Terzaghi, USBR, and the COE have been used to review and approve filter designs for fill dams. More recently, the state favors the SCS criteria based on Sherard and SCS laboratory studies.

Reference is made to the recent SCS filter publication, Soil Mechanics Note No. 1 and the USBR Chapter 5, Protective Filters, Embankment Dams Design

Filters, Chapitre 5. Le granulat fin, selon l'ASTM C33, est généralement accepté comme filtre pour une grande variété de sols. La dimension 7 ou 8, selon l'ASTM C33, définissant le gros granulat à béton est acceptable comme matériau constituant un filtre/drain.

On attire l'attention sur l'utilisation de méthodes appropriées de construction pour éviter la ségrégation, la contamination du sol, et la dégradation durant le compactage et la mise en place. Sujets controversés : conception des filtres dans le cas de matériaux de noyau à granulométrie étalée, et acceptation de la position de Sherard sur le rôle critique du filtre dans la protection du noyau.

Les commentaires du Colorado ont été préparés par Dennis G. Miller.

KANSAS

George A. Austin
Water Structures Section Head
Kansas State Board of Agriculture
Division of Water Ressources
109 SW Ninth Street, Suite 202
Topeka, Kansas 66612
États-Unis

L'agence gouvernementale affirme que la plupart des ouvrages conçus dans le Kansas l'ont été conformément aux critères de conception des barrages de l'US Soil Conservation Service (SCS). L'agence utilise les critères de filtre reconnus, tels ceux des organismes suivants : COE, SCS et USBR.

Un cas de défaillance d'un filtre/drain est mentionné. La rupture est survenue sur un évacuateur de crue à coursier latéral et résulte d'une surpression non déchargée par le filtre/drain. Cette rupture est survenue sans signe avant-coureur; aucune information plus détaillée n'est disponible à ce sujet.

LOUISIANE

E. J. Breckwoldt, Engineer Administrator
Louisiana Department of Transportation and Development
Flood Control and Water Management
PO Box 9425
Baton Rouge, Louisiana 70804
États-Unis

Des ingénieurs conseils en géotechnique participent à la conception des barrages en remblai. Des drains-cheminée et des sous-drains sont utilisés dans la plupart des barrages.

Standards. Fine aggregate, ASTM C33, is commonly allowed as a filter for a wide range of soils. Size 7 or 8, ASTM C33, for coarse concrete aggregate is acceptable for coarse filter/drain material.

Proper construction practices for compaction and to avoid segregation, soil contamination, and degradation during compaction and placement are emphasized. Controversial issues: design of filters for widely-graded core materials, and acceptance of Sherard's reliance on the critical filter to protect the core.

Colorado comments were prepared by Dennis G. Miller.

KANSAS

George A. Austin
Water Structures Section Head
Kansas State Board of Agriculture
Division of Water Resources
109 SW Ninth Street, Suite 202
Topeka, Kansas 66612
USA

The state agency states that most structures designed in Kansas follow US Soil Conservation Service (SCS) criteria when designing dams. The agency uses recognized filter criteria, such as, US COE, SCS and USBR when reviewing design.

One failure of a filter/drain is cited. The failure occurred at a side channel ogee spillway as a result of high uplift pressure which the filter/drain did not relieve. The failure occurred without warning; no other detailed information is available.

LOUISIANA

E. J. Breckwoldt, Engineer Administrator
Louisiana Department of Transportation and Development
Flood Control and Water Management
PO Box 94245
Baton Rouge, Louisiana 70804
USA

Geotechnical consultants are hired to perform designs of embankment dams. Chimney and underdrains are used for most dam designs.

MICHIGAN

John W. Dexter, Chief, Dam Safety Unit
Department of Natural Resources
Land and Water Management Division
PO Box 30028
Lansing, Michigan 48909
États-Unis

Il est suggéré, dans la réponse, de faire mention de l'utilisation des géotextiles comme filtres.

CAROLINE DU NORD

Charles H. Gardner
Department of Environment, Health and Natural Resources
Division of Land Resources
PO Box 27687
Raleigh, North Carolina 27611
États-Unis

Dans la réponse, il est suggéré que l'usage répandu des géotextiles pour remplacer des filtres granulaires soit traité dans les points de vue « controversés ».

PENNSYLVANIE

Joseph J. Ellam, Director
Bureau of Dams and Waterway Management
Department of Environmental Resources
PO Box 8554
Harrisburg, Pennsylvania 17105
États-Unis

La conception des filtres au sein de cette agence gouvernementale a suivi les critères classiques établis par Terzaghi; plus récemment, l'agence a accepté le perfectionnement apporté par le SCS où quatre catégories de sol sont traitées séparément. L'agence préconise l'exécution d'essais fréquents sur le matériau de base et le matériau filtre durant la construction afin d'assurer la qualité des matériaux. Les colliers étanches autour des conduits ont été remplacés par des colliers de matériaux filtres.

La quasi-rupture du barrage Leawitt Branch sur la rivière Brodhead dans le comté de Monroe est un exemple bien documenté. Les sorties de drains de plusieurs barrages en Pennsylvanie sont bouchées totalement ou partiellement avec l'ocre de fer produit par des bactéries.

Points de vue controversés :

- 1) Utilisation de granulats calcaires ou dolomitiques pour des filtres baignant dans une eau acide, et
- 2) Degré de compactage des filtres.

MICHIGAN

John W. Dexter, Chief, Dam Safety Unit
Department of Natural Resources
Land and Water Management Division
PO Box 30028
Lansing, Michigan 48909
USA

The reply suggests that some mention be made of the use of geotextile filters.

NORTH CAROLINA

Charles H. Gardner
Department of Environment, Health and Natural Resources
Division of Land Resources
PO Box 27687
Raleigh, North Carolina 27611
USA

The response suggests that widespread substitution of geotextiles for granular filters be included under "controversial" issues.

PENNSYLVANIA

Joseph J. Ellam, Director
Bureau of Dams and Waterway Management
Department of Environmental Resources
PO Box 8554
Harrisburg, Pennsylvania 17105
USA

Review of filter design by this state agency has followed the classic Terzaghi criteria; more recently, the agency favors the SCS refinement in which four categories of soils are treated separately. The agency advocates frequent tests of the base and filter material during construction to assure the quality of the materials. Cutoff collars on conduits are being eliminated in favor of filter collars.

The near failure of the Leavitt Branch Dam on Brodhead Creek in Monroe County is a well-documented case history. Many dams in Pennsylvania have drain outlets plugged or partially plugged with iron ochre, the product of a bacteria.

Controversial issues :

- 1) Use of limestone or dolomite aggregate for filters in an acid water environment, and
- 2) Degree of compaction for filters.

TENNESSEE

Lyle Bentley, Safe Dams Section
Bureau of Environment
Division of Water Supply
TERRA Building
150 Ninth Avenue North
Department of Health and Environment
Nashville, Tennessee 37247
États-Unis

Les spécifications techniques de diverses agences concernant les filtres sont fournies; celles-ci citent les critères types de Terzaghi. L'envoi comprend un détail de la sortie d'une conduite d'évacuateur de crue, illustrant l'utilisation de filtres et d'un riprap.

WYOMING

David S. Benner, Safety of Dams Engineer
State Engineer's Office
Herschler Building 4-E
Cheyenne, Wyoming 82002
États-Unis

L'agence ne permet pas l'utilisation de géotextiles pour les drains-cheminée et les drains de pied à l'intérieur des barrages, c'est-à-dire aux endroits où le système filtre/drain est nécessaire à la stabilité. Le texte de Cedergren sert de référence pour vérifier la valeur des filtres et drains incorporés dans les barrages en remblai.

TENNESSEE

Lyle Bentley, Safe Dams Section
Bureau of Environment
Division of Water Supply
TERRA Building
150 Ninth Avenue North
Department of Health and Environment
Nashville, Tennessee 37247
USA

The agencies' Specifications for Filters are provided; these cite the typical Terzaghi criteria. The submittal included an outlet detail for a spillway conduit illustrating the use of filters and riprap.

WYOMING

David S. Benner, Safety of Dams Engineer
State Engineer's Office
Herschler Building, 4-E
Cheyenne, Wyoming 82002
USA

The regulatory agency does not allow the use of geotextiles (filter fabric) for chimney or toe drains within dams, i.e., in locations where the filter/drain system is required for stability. Cedergren's text is used to review the adequacy of internal filters and drains for embankment dams.

**EXTRAIT D'UN DOCUMENT RUSSE INTITULÉ « PRINCIPES DE BASE
DE LA TECHNIQUE DES FILTRES INVERSÉS A L'INTERFACE
AVEC DES MATÉRIAUX COHÉRENTS ET NON COHÉRENTS »**

Extrait préparé par le Dr Jacek Mlynarek de l'École Polytechnique de Montréal

SYMBOLES (sols pulvérulents)

- C_U Coefficient d'uniformité du sol à protéger.
 C_{UF} Coefficient d'uniformité du filtre.
 D_I Diamètre des particules du filtre pour lequel il existe un pourcentage I en poids de particules plus fines.
 d_I Diamètre des particules du sol à protéger pour lequel il existe un pourcentage I en poids de particules plus fines.
 D_{MIN} Diamètre minimal des particules du filtre.
 d_{SF} Diamètre caractéristique des particules du matériau à protéger permettant l'autofiltration (dans le document russe, d_a , particules permettant la formation de voûtes).
 K_F Coefficient de perméabilité du filtre.
 K_g Coefficient de perméabilité du sol à protéger.
 n Indice des vides du sol à protéger.
 n_F Indice des vides du filtre.
 O_s Grandeur moyenne des vides du sol à protéger.
 O_s^{max} Grandeur maximale des vides du sol à protéger.
 I Gradient hydraulique.
 I_{cr} Gradient hydraulique critique moyen.

**EXCERPT OF A RUSSIAN SUBMITTAL ENTITLED “ BASIC PRINCIPLES
OF ENGINEERING INVERTED FILTERS AT THE INTERFACE
WITH COHESIVE AND NON-COHESIVE SOILS ”**

Excerpt prepared by Dr. Jacek Mlynarek of École Polytechnique, Montreal

NOTATION (non cohesive soils)

- C_U Coefficient of uniformity of base soil.
 C_{UF} Coefficient of uniformity of filter.
 D_I Filter particle diameter with “ I ” percent in mass and less.
 d_I Diameter of base particle for which a percentage I by weight is smaller.
 D_{MIN} Minimal diameter of particles in filter.
 d_{SF} Characteristic diameter of base particles capable of initiating self-filtration (in Russian document, d_{ar} : arch - forming particles).
 K_F Coefficient of permeability of filter.
 K_g Coefficient of permeability of base soil.
 n Porosity of base soil.
 n_F Porosity of filter.
 O_s Average pore size of base soil.
 O_s^{max} Maximal pore size of base soil.
 I Hydraulic gradient.
 I_{cr} Average critical hydraulic gradient.

SYMBOLES (sols cohérents)

ρ_s	Densité des particules du sol.
ρ_w	Densité de l'eau
g	Accélération due à la gravité.
I_D	Gradient hydraulique de projet pour un sol cohérent qui peut se présenter à l'entrée du filtre.
F	Coefficient de sécurité variant avec le type de construction : 1,10 à 1,25
O_F^D	Diamètre de projet des vides du filtre.
D_{17}	Diamètre particulier de projet des particules du filtre.
O_F^{\max}	Grandeur maximale des vides du filtre
O_F	Grandeur moyenne des vides du filtre.
I_E	Gradient hydraulique de projet à l'interface pour un écoulement parallèle à l'interface : $I_E = \sin \alpha < 1$.
α	Angle du talus aval du noyau par rapport à l'horizontale.
I_{CR}	Gradient hydraulique critique pour un écoulement le long de l'interface.
d_{AG}	Dimension du granulat du sol à protéger = $20 \times d_{50}$.

NOTATION (cohesive soil)

ρ_s	Soil particles density.
ρ_w	Water density.
g	Acceleration of gravity.
I_D	Design hydraulic gradient for the given cohesive soil which can occur at the entry to the filter.
F	Safety factor depending on the type of construction : $F = 1.10$ to 1.25 .
O_F^D	Design pore size diameter of the filter layer.
D_{17}	Design particle size of the filter.
O_F^{\max}	Maximum pore size diameter of the filter layer.
O_F	Average pore size of the filter.
I_E	Design hydraulic gradient at the interface for a flow parallel to the interface $I_E = \sin \alpha < 1$.
α	Angle of the core downstream slope relative to the horizon.
I_{CR}	Critical hydraulic gradient for the flow along the interface.
d_{AG}	Base soil aggregate size : $= 20 \times d_{50}$.

1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La granulométrie du filtre devra être telle qu'elle permet d'éviter :

- L'érosion des particules argileuses à l'interface avec le filtre;
- Le passage des particules des sols à protéger dans les vides du filtre lors d'un écoulement vers le bas ou vers le haut;
- L'érosion des particules au contact filtre/sol à protéger dans le cas d'un écoulement le long de ce contact;
- Le colmatage du filtre par les fines arrachées au sol à protéger;
- La stabilité interne de la couche de filtre elle-même.

Les étapes à franchir lors de la conception des filtres seront les suivantes :

a) Identification des paramètres du sol à protéger nécessaires pour la conception du filtre :

- Granulométrie;
- Masse volumique;
- Pourcentage de vides;
- Coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique);
- Évaluation de la résistance du sol à protéger à l'érosion interne (stabilité interne du sol);
- Évaluation du diamètre caractéristique des particules du sol à protéger permettant l'autofiltration;
- Évaluation du diamètre des vides du sol à protéger.

b) Sélection des matériaux granulaires naturels disponibles ou des matériaux granulaires fabriqués, à utiliser comme filtres.

c) Évaluation de la résistance à l'érosion et de la stabilité interne des matériaux à protéger et des filtres choisis.

d) Détermination de l'épaisseur du filtre et du nombre de couches nécessaires, le cas échéant.

e) Évaluation des limites de la stabilité interne à l'interface sol/filtre ainsi que de l'épaisseur du filtre et de sa masse volumique.

1. GENERAL CONSIDERATIONS

Gradation of the filter should be such as to prevent :

- Erosion of clayey particles at interface with filters;
- Passage of particles of base soils into filter pores in both downward and upward direction flow conditions;
- Contact erosion of particles in case of flow direction along filter/base soil interface;
- Clogging of the filter by fines washed-out from a base soil;
- Internal instability of the filter layer, itself.

Steps of engineering procedure to design filters should be as follows :

a) Identification of the base soil parameters needed to design filter :

- Gradation;
- Density;
- Porosity;
- Coefficient of permeability (hydraulic conductivity);
- Evaluation of base soil resistance to piping (soil's internal stability);

• Evaluation of characteristic diameter of base particles capable of initiating self-filtration (so called in Russian document " arch-forming " particles);

- Evaluation of pore sizes (diameters) of base soil.

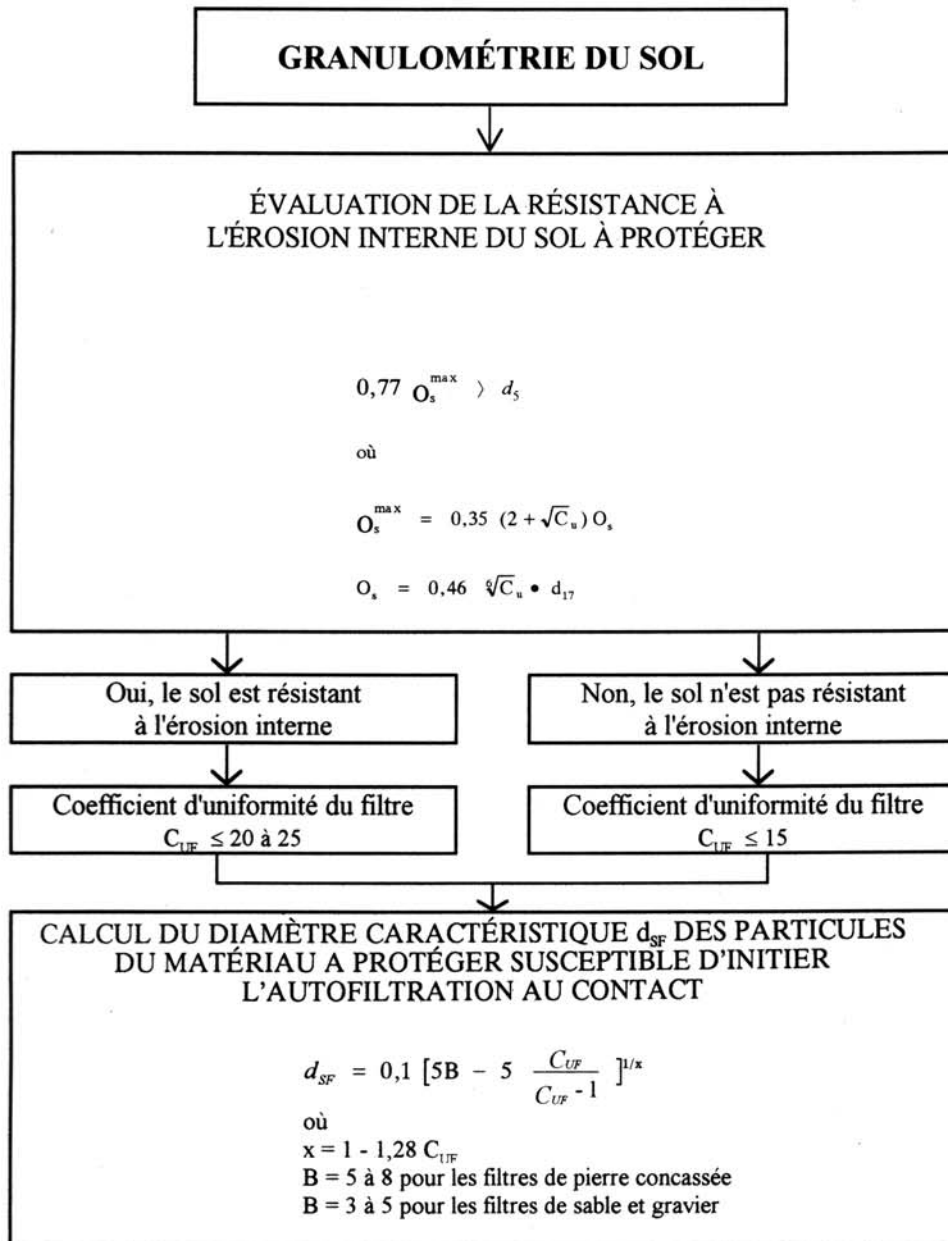
b) Selection of existing natural granular materials, or artificially produced granular materials to be used as filters.

c) Evaluation of resistance to piping and stability of base soils and selected filters.

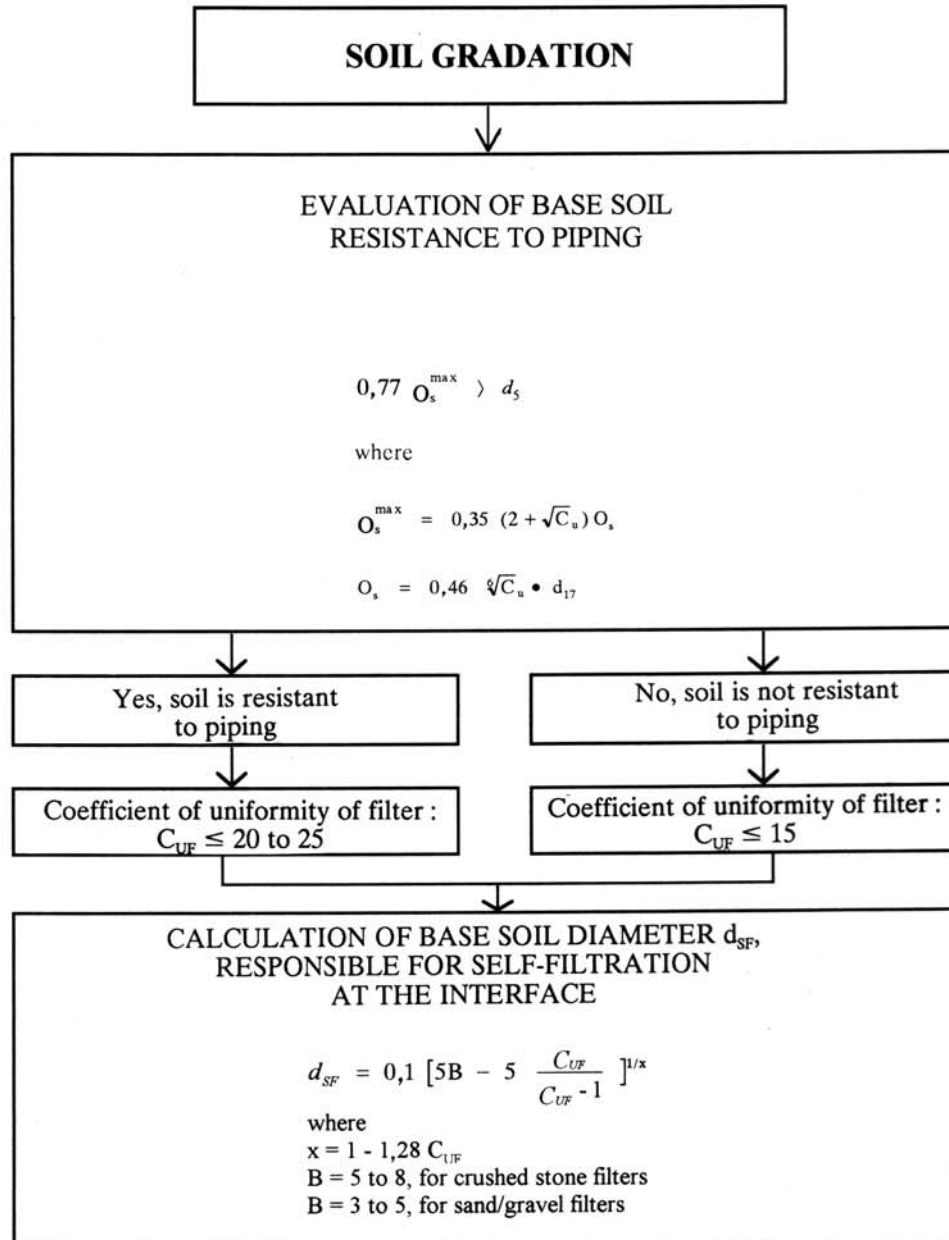
d) Determination of filter thickness and number of layers, if needed.

e) Estimation of limits of soil/filter interface stability as well as filter thickness and density.

**2. PROCÉDURE DE CONCEPTION
A UTILISER POUR LES SOLS NON COHÉRENTS**



2. DESIGN PROCEDURE TO BE USED IN COHESIONLESS SOILS



CALCUL DU DIAMÈTRE DU FILTRE D_{17} RESPONSABLE DE LA STABILITÉ AU CONTACT DES DEUX MATÉRIAUX

$$D_{17} \leq \frac{1}{0,252 \sqrt[6]{C_{UF}}} \times \frac{1 - n_F}{n_F} \times d_{SF}$$

où

$$n_F = 0,43 - 0,11 g C_{UF}$$

CALCUL DE LA GRANULOMÉTRIE DU FILTRE

$$D_{MIN} = \frac{D_{17}}{1 + 1,7 \times \frac{C_{UF} - 1}{C_{UF}}}$$

$$D_i = \left[1 + (0,1 \rho_i) \times \frac{n_F - 1}{5 n_F} \right] \times D_{MIN}$$

CRITÈRE DE PERMÉABILITÉ

ÉCOULEMENT LAMINAIRE

$$K_F = \frac{4,0 \rho_1}{\nu} \times \sqrt[3]{C_{UF}} \times \frac{n_F^3}{(1 - n_F)^2} \times D_{17}^2$$

où

ρ_1 = coefficient de forme des particules

$\rho_1 = 1,0$ pour les particules de sable et gravier

$\rho_1 = 0,35$ à $0,4$ pour la pierre concassée

ν = coefficient de viscosité cinématique

ÉCOULEMENT TURBULENT

$$K_F = 20,4 n_F \times \frac{\sqrt{n_F}}{1 - n_F} \times \sqrt[12]{C_{UF}} \times \sqrt{D_{17}}$$

$$K_F \geq (2 + \sqrt[6]{C_{UF}}) K_g$$

CALCULATION OF FILTER DIAMETER D_{17} ,
RESPONSIBLE FOR INTERFACE STABILITY

$$D_{17} \leq \frac{1}{0,252\sqrt[6]{C_{UF}}} \times \frac{1 - n_F}{n_F} \times d_{SF}$$

where

$$n_F = 0,43 - 0,11g C_{UF}$$

CALCULATION OF FILTER GRADATION

$$D_{MIN} = \frac{D_{17}}{1 + 1,7 \times \frac{C_{UF} - 1}{C_{UF}}}$$

$$D_i = \left[1 + (0,1\rho_i) \times \frac{n_F - 1}{5n_F} \right] \times D_{MIN}$$

PERMEABILITY CRITERION

FOR LAMINAR FLOW

$$K_f = \frac{4,0\rho_1}{v} \times \sqrt[6]{C_{UF}} \times \frac{n_F^3}{(1 - n_F)^2} \times D_{17}^2$$

where

ρ_1 = coefficient of form of particles

$\rho_1 = 1,0$ for sand/gravel particles

$\rho_1 = 0,35$ to $0,4$, for crushed stone

v = coefficient of kinematic viscosity

FOR TURBULENT FLOW

$$K_f = 20,4 n_F \times \frac{\sqrt{n_F}}{1 - n_F} \times \sqrt[6]{C_{UF}} \times \sqrt{D_{17}}$$

$$K_f \geq (2 + \sqrt[6]{C_{UF}}) K_g$$

ÉVALUATION DU GRADIENT HYDRAULIQUE CRITIQUE

$$I_{CR} = 0,32 \rho_o \times \sqrt{\frac{n \cdot g}{n \times K_c}}$$

où

$$\rho_o = 0,60 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \times f \times \sin \left(30^\circ + \frac{\Theta}{8} \right)$$

f = coefficient de frottement entre les particules

$$f = 0,20 \times n \times \left(2 + \sqrt{C_U} \right)$$

Θ = angle entre la direction de la gravité et celle de l'écoulement

GRADIENT HYDRAULIQUE À L'INTERFACE
DOIT ÊTRE PLUS FAIBLE QUE LE
GRADIENT HYDRAULIQUE CRITIQUE

$$I < I_{CR}$$

ÉPAISSEUR MINIMALE DU FILTRE

$$T_{MIN} \geq 5 D_{90}$$

EVALUATION OF CRITICAL HYDRAULIC GRADIENT

$$I_{CR} = 0,32 \rho_o \times \sqrt{\frac{n \cdot g}{n \times K_s}}$$

where

$$\rho_o = 0,60 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \times f \times \sin \left(30^\circ + \frac{\Theta}{8} \right)$$

f = coefficient of inter-particles friction

$$f = 0,20 \times n \times \left(2 + \sqrt{C_u} \right)$$

Θ = angle between gravity and flow direction

↓

HYDRAULIC GRADIENT
AT THE INTERFACE HAS
TO BE LOWER THAN CRITICAL
HYDRAULIC GRADIENT

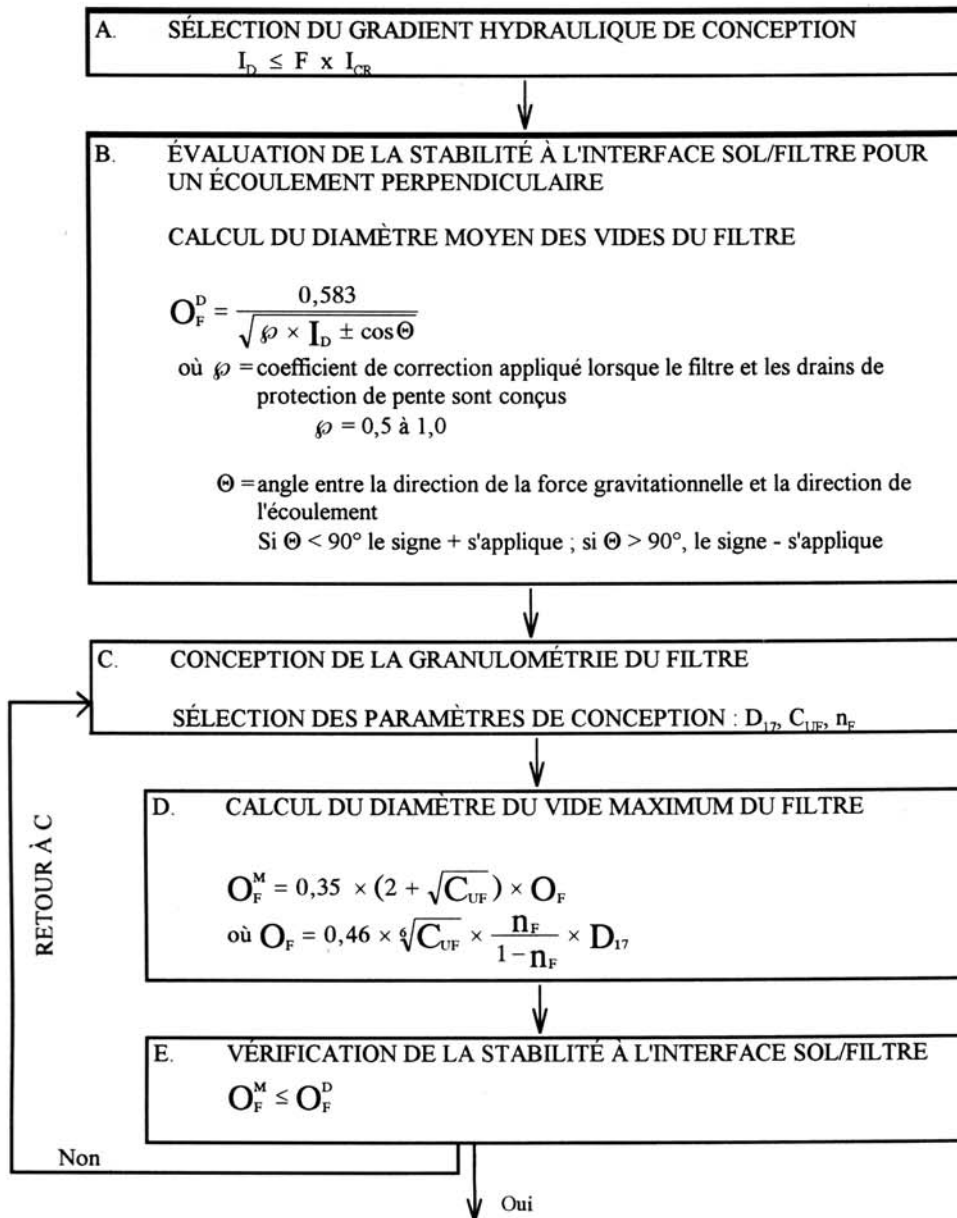
$$I < I_{CR}$$

↓

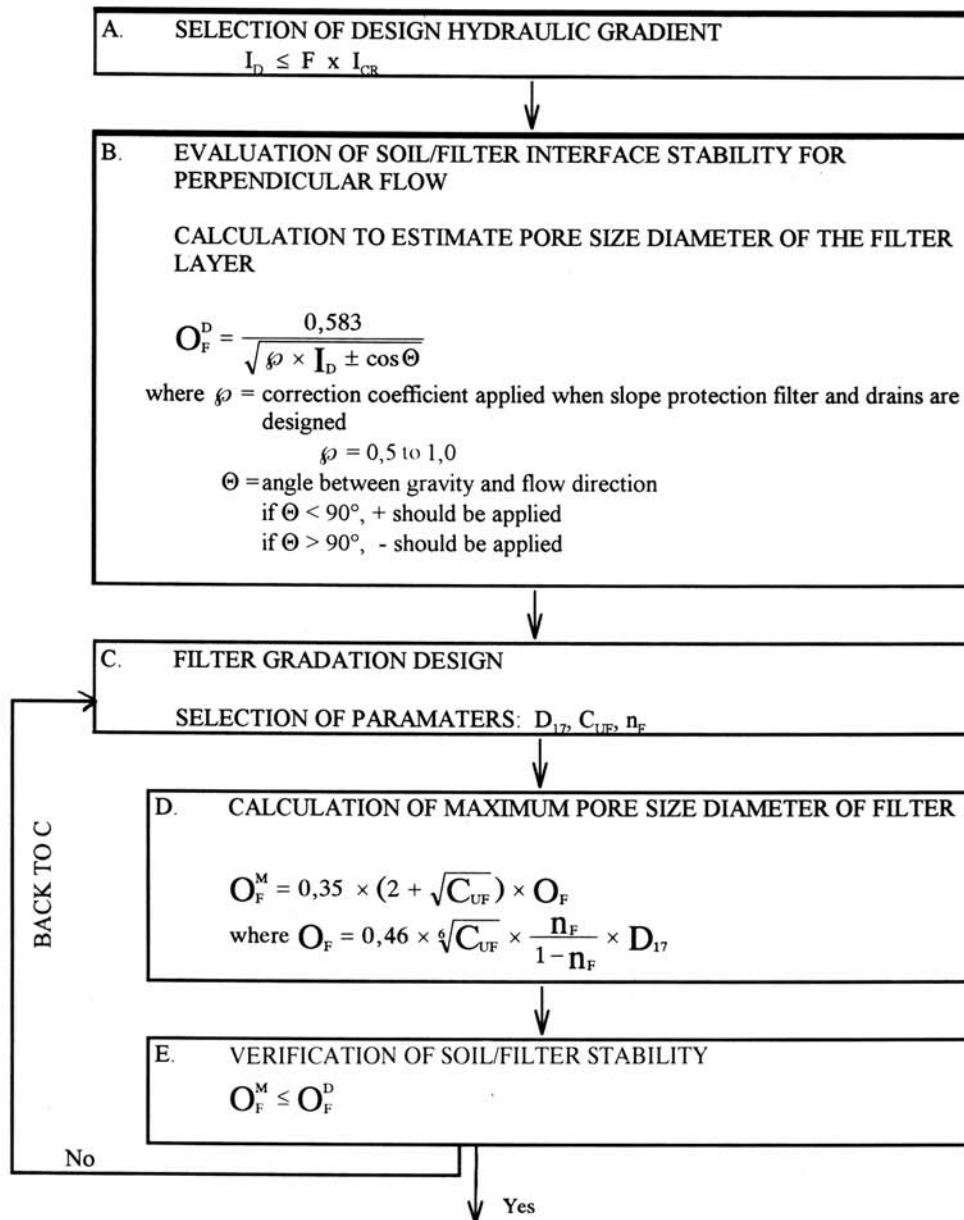
MINIMAL FILTER THICKNESS

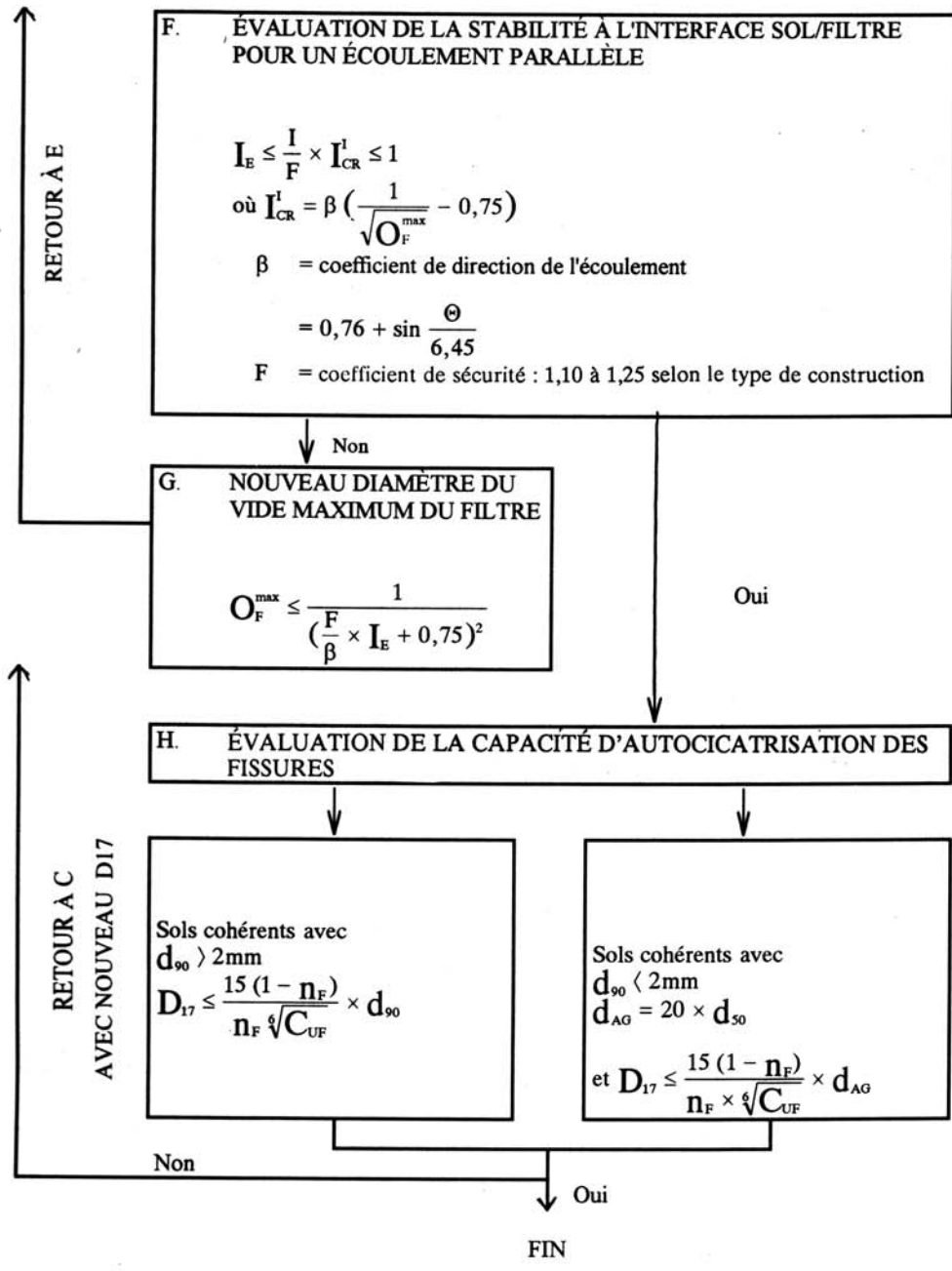
$$T_{MIN} \geq 5 D_{90}$$

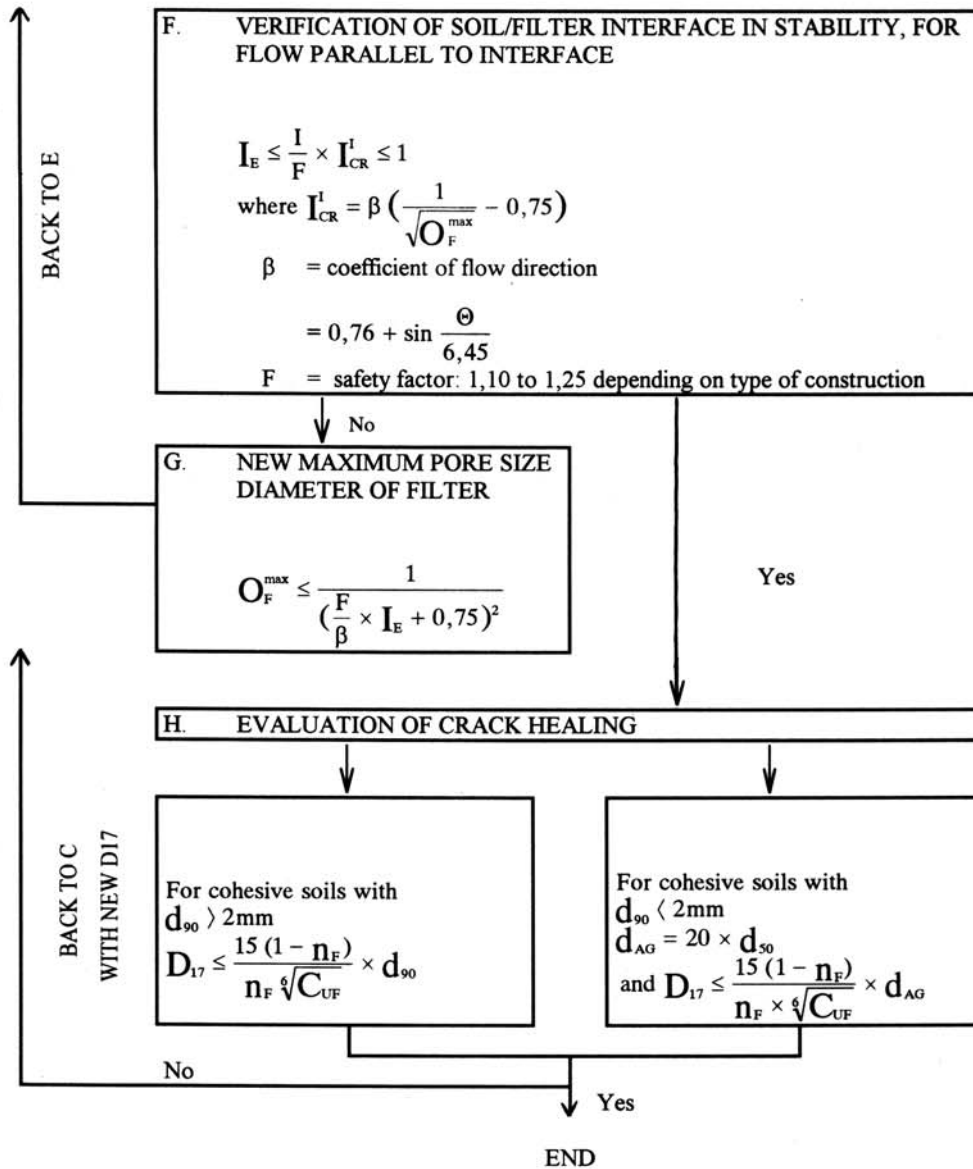
3. PROCÉDURE DE CONCEPTION A UTILISER POUR LES SOLS COHÉRENTS



3. DESIGN PROCEDURE TO BE USED IN COHESIVE SOILS







Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : juillet 1994
N° 16869
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>