

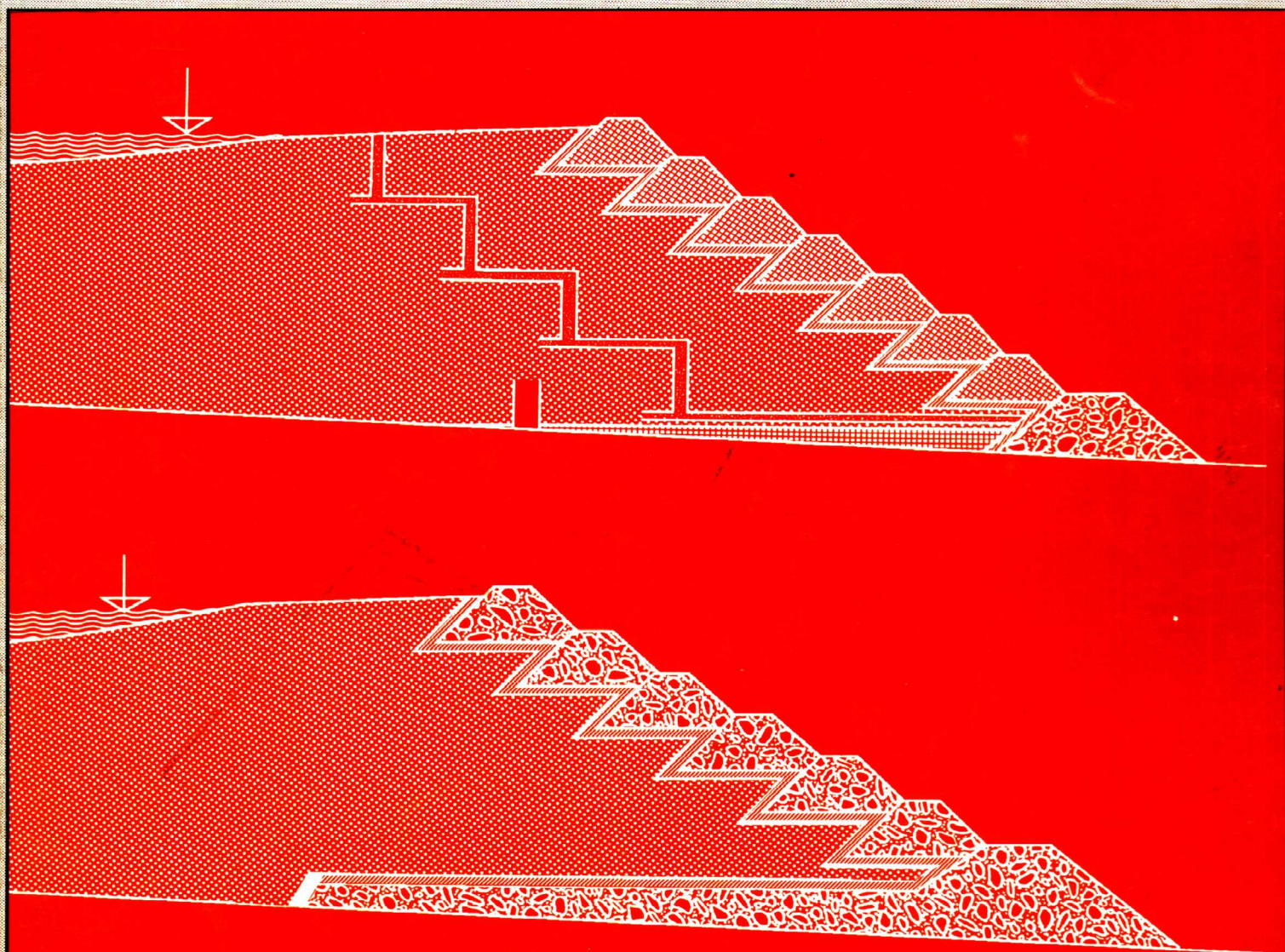
TAILINGS DAMS DESIGN OF DRAINAGE

Review and recommendations

BARRAGES DE STERILES CONCEPTION DU DRAINAGE

Synthèse et recommandations

Bulletin 97



1994

Original text in English

French translation by J.-M. Dupas and Y. Le May.

Texte original en anglais

Traduction en français par J.-M. Dupas et 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.

TAILINGS DAMS DESIGN OF DRAINAGE

Review and recommendations

BARRAGES DE STERILES CONCEPTION DU DRAINAGE

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 MINE AND INDUSTRIAL TAILINGS DAMS
COMITÉ DES BARRAGES DE STÉRILES MINIERS ET INDUSTRIELS
(1989-1995)

Chairman/Président Great Britain/Grande-Bretagne	A. D. M. PENMAN
Members/Membres	
Australia/Australie	M. D. FITZPATRICK (1) J. PHILIPS (2)
Brazil/Brésil	F. MIGUEZ DE MELLO
Bulgaria/Bulgarie	C. B. ABADJIEV
Canada/Canada	E. J. KLOHN
Chile/Chili	G. NOGUERA
China/Chine	LIU Zhejun (3)
France/France	J.-M. DUPAS
Germany/Allemagne	J. BRAUNS
Italy/Italie	F. CAPOZZA (4) G. RUGGERI (5)
South Africa/Afrique du Sud	J. R. WILLIAMSON
Sweden/Suède	J. EURENIUS
USA/États-Unis	E. S. SMITH (6) S. G. VICK (7)

-
- (1) Member until 1993/Membre jusqu'en 1993.
(2) Member since 1993/Membre depuis 1993.
(3) Member since 1993/Membre depuis 1993.
(4) Member until 1993/Membre jusqu'en 1993.
(5) Member since 1993/Membre depuis 1993.
(6) Member until 1991/Membre jusqu'en 1991.
(7) Member since 1991/Membre depuis 1991.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. TYPES DE BARRAGES
DE STÉRILES
3. CARACTÉRISTIQUES
DES STÉRILES
4. BUT DU DRAINAGE
DANS LES BARRAGES
DE STÉRILES
5. DRAINAGE DANS LES
DIFFÉRENTS TYPES
DE BARRAGES DE STÉRILES
6. DRAINAGE DANS LE CAS DE
FONDATIONS PERMÉABLES
7. MESURES CONFORATIVES
PENDANT L'EXPLOITATION
8. FILTRES
9. DRAINS
10. CONCLUSIONS

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. TYPES OF TAILINGS DAMS
3. FEATURES OF TAILINGS
PROPERTIES
4. PURPOSE OF DRAINAGE
IN TAILINGS DAMS
5. DRAINAGE IN VARIOUS
TYPES OF TAILINGS DAMS
6. DRAINAGE WITH PERME-
ABLE FOUNDATIONS
7. REMEDIAL MEASURES DUR-
ING OPERATION
8. FILTERS
9. DRAINS
10. CONCLUSIONS

APPENDICES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	12
1. INTRODUCTION	14
2. TYPES DE BARRAGES DE STÉRILES	16
3. CARACTÉRISTIQUES DES STÉRILES	18
4. BUT DU DRAINAGE DANS LES BARRAGES DE STÉRILES	20
5. DRAINAGE DANS LES DIFFÉRENTS TYPES DE BARRAGES DE STÉRILES	24
5.1. Barrages de stériles du type conventionnel à retenue d'eau	24
5.2. Barrages de stériles construits par la méthode amont	28
5.2.1. Remblai d'amorce réalisé en matériau très perméable	30
5.2.2. Remblai d'amorce réalisé en matériau de faible perméabilité	34
5.2.3. Drainage du talus aval	38
5.2.4. Le cyclonage	42
5.3. Barrages de stériles construits par la méthode aval	46
5.4. Barrages de stériles construits par la méthode de l'axe central	50
5.5. Barrages de stériles de construction mixte	52
6. DRAINAGE DANS LE CAS DE FONDATIONS PERMÉABLES	54
6.1. Couche perméable d'épaisseur limitée sous le barrage de stériles	54
6.1.1. Barrages de stériles construits par la méthode amont	54
6.1.2. Barrages de stériles construits par la méthode aval	56
6.2. Fondation perméable sur une forte épaisseur	56
7. MESURES CONFORTATIVES PENDANT L'EXPLOITATION	60
7.1. Anomalies dans la conception du drainage	60
7.1.1. Anomalies dans la granulométrie des stériles ou dans la conception et le dimensionnement des drains	60
7.1.2. Anomalie dans la conception de l'évacuateur de crue	62
7.1.3. Anomalie dans les méthodes de déversement	64
7.2. Changement dans les données du projet	64
7.2.1. Changement dans les caractéristiques des stériles	64
7.2.2. Hauteur du barrage plus grande que prévu	64
7.3. Mauvais fonctionnement d'un drainage bien conçu	64
7.4. Déficiences du déversement	66

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	13
1. INTRODUCTION	15
2. TYPES OF TAILINGS DAMS	17
3. FEATURES OF TAILINGS PROPERTIES	19
4. PURPOSE OF DRAINAGE IN TAILINGS DAMS	21
5. DRAINAGE IN VARIOUS TYPES OF TAILINGS DAMS	25
5.1. Tailings Dams of Water Retention Type	25
5.2. Tailings Dams of Upstream Construction	29
5.2.1. Starter Dam of High Permeability Material	31
5.2.2. Starter Dam of Low Permeability Material	35
5.2.3. Downstream Face Drainage	39
5.2.4. Cycloning	43
5.3. Tailings Dams of Downstream Construction	47
5.4. Tailings Dams of Centreline Construction	51
5.5. Tailings Dams of Mixed Construction	53
6. DRAINAGE WITH PERMEABLE FOUNDATIONS	55
6.1. Permeable Layer of Limited Thickness Under the Tailings Dam	55
6.1.1. Tailings Dams of Upstream Construction	55
6.1.2. Tailings Dams of Downstream Construction	57
6.2. Permeable Foundation to Substantial Depth	57
7. REMEDIAL MEASURES DURING OPERATION	61
7.1. Deficiencies in Drainage Planning and Design	61
7.1.1. Deficiencies in Particle Size Distribution of Tailings or the Structure and Dimensions of Drains	61
7.1.2. Deficiency in Spillway Design	63
7.1.3. Deficiency in Spigotting Methods	65
7.2. Changes in Design Data	65
7.2.1. Change in Properties of Tailings	65
7.2.2. Height of Dam Greater than Designed	65
7.3. Malfunction of Well Designed Drainage	65
7.4. Spigotting Deficiencies	67

8. FILTRES	68
8.1. Filtres en matériau granulaire protégeant des sols non cohérents - Critères et prescriptions	68
8.1.1. Critères d'entraînement	70
8.1.2. Critères de perméabilité	72
8.1.3. Critères de stabilité interne	72
8.1.4. Prescriptions relatives à la protection vis-à-vis de la ségrégation	76
8.1.5. Prescriptions relatives à la protection vis-à-vis du colmatage	76
8.1.6. Critères hydrauliques	76
8.1.7. Épaisseur des filtres	76
8.1.8. Densité et compactage	78
8.1.9. Stabilité mécanique, chimique et biologique	78
8.1.10. Critère de non-cohésion des filtres	80
8.2. Filtres en matériau granulaire protégeant des sols cohérents - Critères et prescriptions	80
8.3. Filtres en matériau synthétique - Critères et prescriptions	82
9. DRAINS	88
9.1. Fonctions des drains	88
9.2. Emplacement des drains	88
9.3. Largeur des drains	88
9.4. Épaisseur des drains	90
9.5. Matériaux pour drains	92
9.6. Ouvrages d'évacuation des drains	96
9.7. Dispositifs filtre-drain	96
10. CONCLUSIONS	102
ANNEXES	105
Annexe A - Percolations à travers les barrages de stériles construits par la méthode amont	106
Annexe B - Références	118

8. FILTERS	69
8.1. Filters of Granular Materials Protecting Non-Cohesive Soils - Criteria and Requirements	69
8.1.1. Piping Criteria	71
8.1.2. Permeability Criterion	73
8.1.3. Internal Stability Criteria	73
8.1.4. Segregation Protection Requirements	77
8.1.5. Protection Requirements against Clogging	77
8.1.6. Hydraulic Criteria	77
8.1.7. Thickness of Filters	77
8.1.8. Density and Compaction	79
8.1.9. Mechanical, Chemical and Biological Stability	79
8.1.10. Criterion of Filter Non-Cohesiveness	81
8.2. Filters of Granular Materials Protecting Cohesive Soils - Criteria and Requirements	81
8.3. Synthetic Filter Fabrics - Criteria and Requirements	83
9. DRAINS	89
9.1. Functions of Drains	89
9.2. Location of Drains	89
9.3. Width of Drains	89
9.4. Thickness of Drains	91
9.5. Materials to be Used in Drains	93
9.6. Drains Outlets	97
9.7. Filter and Drain Systems	97
10. CONCLUSION	103
APPENDICES	105
Appendix A - Seepage through Upstream Tailings Dams	107
Appendix B - References	118

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1. – Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau - Les stériles restent toujours immergés.
- Fig. 2. – Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau - Déversement à partir du barrage.
- Fig. 3. – Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau - Déversement à partir de l'extrémité amont du réservoir.
- Fig. 4. – Étapes de construction - Barrage homogène et barrage avec cheminée drainante.
- Fig. 5. – Barrage en enrochement.
- Fig. 6. – Barrage de stériles construit par la méthode amont.
- Fig. 7. – Tapis drainant amont immergé.
- Fig. 8. – Méthode améliorée de construction amont.
- Fig. 9. – Remblai d'amorce en terre.
- Fig. 10. – Remblai d'amorce en terre.
- Fig. 11. – Drainage en partie haute du remblai d'amorce.
- Fig. 12. – Écran en partie basse du talus amont du remblai d'amorce.
- Fig. 13. – Remblai d'amorce et digues en matériau perméable.
- Fig. 14. – Remblai d'amorce et digues en matériau imperméable.
- Fig. 15. – Dignes imperméables suivant une pente plus faible.
- Fig. 16. – Remblai d'amorce non perméable.
- Fig. 17. – Utilisation de bandes drainantes.
- Fig. 18. – Utilisation de drain cheminée et tapis drainant.
- Fig. 19. – Dignes secondaires en sable cyclonné.
- Fig. 20. – Utilisation de sable cyclonné en recharge stabilisatrice.
- Fig. 21. – Combinaison des procédés de cyclonage et de déversement.
- Fig. 22. – Tapis drainant en sable cyclonné.
- Fig. 23. – Barrage de stériles construit par la méthode aval.
- Fig. 24. – Barrage de stériles construit par la méthode aval.
- Fig. 25. – Barrage de stériles construit par la méthode de l'axe central.
- Fig. 26. – Barrage de stériles de construction mixte.
- Fig. 27. – Couche perméable de fondation.
- Fig. 28. – Couche perméable de fondation.
- Fig. 29. – Drains au-dessus de la géomembrane.
- Fig. 30. – Mesures confortatives.
- Fig. 31. – Mesures confortatives.
- Fig. 32. – Mesures confortatives.
- Fig. 33. – Analyse de la stabilité interne des sols par coupure de la granulométrie.
- Fig. 34. – Schéma définissant la largeur du drain horizontal.
- Fig. 35. – Drains flottants.
- Fig. 36. – Bretelle drainante sur le sol.

LIST OF FIGURES

- Fig. 1. – Water retention type tailings dam - Tailings always remain under water.
- Fig. 2. – Water retention type tailings dam - Spigotting from the dam.
- Fig. 3. – Water retention type tailings dam - Spigotting from the far end of the reservoir.
- Fig. 4. – Construction stages - Homogeneous dams and dams with wall drains.
- Fig. 5. – Rockfill dam.
- Fig. 6. – Tailings dam of upstream construction.
- Fig. 7. – Upstream blanket drainage under water.
- Fig. 8. – Improved upstream construction.
- Fig. 9. – Earthfill starter dam.
- Fig. 10. – Earthfill starter dam.
- Fig. 11. – Drain in the upper part of the starter dam.
- Fig. 12. – Screen on the bottom upstream part of the starter dam.
- Fig. 13. – Starter dam and dykes of permeable material.
- Fig. 14. – Starter dam and dykes of impermeable material.
- Fig. 15. – Impermeable dykes at a flatter slope.
- Fig. 16. – Nonpervious starter dam.
- Fig. 17. – Use of strip drains.
- Fig. 18. – Use of wall and blanket drains.
- Fig. 19. – Cycloned sand secondary dykes.
- Fig. 20. – Use of cycloned sand as remedial toe weighting.
- Fig. 21. – Combined cycloning and spigotting procedure.
- Fig. 22. – Drainage tongue of cycloned sand.
- Fig. 23. – Tailings dam of downstream construction.
- Fig. 24. – Tailings dam of downstream construction.
- Fig. 25. – Tailings dam of centreline construction.
- Fig. 26. – Tailings dam of mixed construction.
- Fig. 27. – Permeable layer in foundation.
- Fig. 28. – Permeable layer in foundation.
- Fig. 29. – Bottom drains over geomembrane.
- Fig. 30. – Remedial measures.
- Fig. 31. – Remedial measures.
- Fig. 32. – Remedial measures.
- Fig. 33. – Analysing the internal stability of soils by splitting the gradation.
- Fig. 34. – Model for the formula for the width of horizontal drainage.
- Fig. 35. – Floating drains.
- Fig. 36. – Strip or finger drains on the ground.

- Fig. 37. – Tapis drainant.
- Fig. 38. – Bretelle drainante flottante.
- Fig. 39. – Filtres sur talus.
- Fig. 40. – Drains préfabriqués.
- Fig. 41. – Effet de l'hétérogénéité horizontale.
- Fig. 42. – Hétérogénéités horizontale et verticale.
- Fig. 43. – Écoulement pour différentes anisotropies.
- Fig. 44. – Effet de l'hétérogénéité et de l'anisotropie.
- Fig. 45. – Effet de la largeur de la plage sur l'écoulement.

- Fig. 37. – Blanket drain.
Fig. 38. – Floating strip drains or drain outlets.
Fig. 39. – Filters on slope.
Fig. 40. – Prefabricated drains.
Fig. 41. – Effect of the horizontal nonhomogeneity.
Fig. 42. – Horizontal and vertical nonhomogeneity.
Fig. 43. – Seepage at different anisotropy.
Fig. 44. – Effect of nonhomogeneity and anisotropy.
Fig. 45. – Effect of the beach width on seepage.

AVANT-PROPOS

Les dégâts pouvant survenir lorsque la ligne de saturation dans un barrage en remblai homogène émerge sur le talus aval sont bien connus. Le vaste programme de mesures de pressions interstitielles, entrepris par l'USBR en 1935, avait comme objectif initial la détermination de la position de la ligne de saturation. Les recherches ultérieures relatives aux pressions interstitielles de construction fournirent d'utiles informations complémentaires. Les tapis drainants placés sous les pieds des digues ont permis de limiter la progression de la ligne de saturation vers l'aval, et Terzaghi réalisa d'énormes progrès lors de la conception du barrage Vigario, situé à l'ouest de Rio et appelé depuis par les Brésiliens « barrage Terzaghi ». Le profil en travers, avec un drain cheminée sur toute la longueur et la hauteur du barrage, situé seulement au huitième de la largeur de la base à l'aval de l'axe de la digue, garantissait que l'eau provenant de l'amont ne parviendrait pas jusqu'au talus aval. Ce profil en travers « brésilien » prend diverses formes, mais toutes ont, comme principe fondamental, le drainage de l'eau de percolation avant qu'elle atteigne la recharge aval.

Ce drainage étendu a été appliqué aux barrages homogènes constitués de remblais silteux mis en place par couches et compactés à une teneur en eau voisine de l'optimum. Dans quelle mesure est-il plus impérieux d'adopter un tel drainage dans les barrages de stériles construits par voie hydraulique sans compactage mécanique?

Les recherches et études sur le comportement des barrages de stériles, effectuées par le Professeur Abadjiev, l'ont conduit à améliorer les méthodes de drainage de ces barrages. Ces améliorations ont été si bénéfiques qu'il n'est plus nécessaire de considérer les barrages construits par la méthode amont comme un type d'ouvrage ayant traditionnellement un faible coefficient de sécurité. Sa nouvelle conception du remblai d'amorce permet d'éviter, lors du dépôt initial des stériles, la formation d'une zone de boues de faible résistance, observée généralement juste à l'amont de ce remblai d'amorce, et d'améliorer beaucoup la stabilité d'une surface de glissement potentiel traversant le pied du barrage de stériles lorsque celui-ci approche de sa hauteur totale.

Nous sommes très reconnaissants au Professeur Abadjiev d'avoir bien voulu rassembler dans le présent Bulletin les diverses méthodes de drainage qu'il recommande pour les barrages de stériles. Il a été aidé dans sa tâche par tous les membres du Comité, et particulièrement par le Professeur J. Brauns qui a revu le chapitre 8 et a fait bénéficier de ses connaissances spéciales des filtres, M. D. Fitzpatrick qui a amélioré le texte anglais et J.-M. Dupas qui a effectué la traduction en français avec la collaboration de Y. Le May. Nous remercions vivement les Comités Nationaux qui ont présenté des commentaires sur le projet de rédaction et contribué efficacement à la préparation finale du Bulletin.

A. D. M. Penman
Président du Comité des Barrages
de Stériles Miniers et Industriels

FOREWORD

The damage that can occur if the phreatic surface in a homogeneous embankment dam moves so far downstream as to intercept the downstream slope was well known. The extensive programme of pore pressure measurements, begun by the USBR in 1935, had as its original intention the determination of the position of the phreatic surface. The discovery and subsequent research into construction pore pressure was an added bonus. Drainage blankets placed under the toes helped to limit the downstream progress of the phreatic surface and Terzaghi made a grandiose gesture with his design of the Vigario dam, just west of Rio, which the Brazilians have since re-named "The Terzaghi Dam". The section, with its wall drain or drain curtain, extending over the whole length and height of the dam, only an eighth of the width downstream of the centre-line, ensured that water from upstream could not trouble the downstream slope. This Brazilian Section takes various forms but all retain the basic principle of draining off pore water before it can reach the downstream supporting shoulder.

This comprehensive drainage has been applied to homogeneous dams built from silty fills placed in layers and compacted at about an optimum water content. How much more necessary must it be to use comprehensive drainage in tailings dams built from hydraulically placed fill without mechanical compaction?

The research and studies of the behaviour of tailings dams made by Professor Abadjiev has led him to design improved method of drainage for these dams. So successful have these methods been that even dams built by upstream construction need no longer be regarded as a type that traditionally has a low factor of safety. His new approach to the starter dam avoids the formation during early deposit of tailings of a zone of low strength slimes, normally found just upstream of that dam and greatly improves stability of a potential slip surface passing through the toe of the tailings dam as it approaches full height.

We are fortunate that Professor Abadjiev has made time to collect his various recommended drainage methods into this one publication. He has been helped in many ways by all members of our Committee, but particular mention must be made of Professor J. Brauns, who reviewed Chapter 8 and added his specialist knowledge of filters, Mr M. D. Fitzpatrick who improved the English and Mr J. M. Dupas who has translated it into French with the help of Mr Y. Le May. We are grateful to the National Committees who submitted comments on the circulated draft, which have been of considerable help in the final preparation of this Bulletin.

A. D. M. Penman
Chairman, Committee on Mine
and Industrial Tailings Dams

1. INTRODUCTION

Le drainage interne est d'une importance vitale pour la fiabilité et la sécurité des barrages de stériles tout au long de leur vie en y incluant la période opérationnelle qui commence lorsque les stériles sont déposés pour la première fois derrière le remblai d'amorce.

Bien que le système de drainage dans les différents types de barrage de stériles varie de façon importante, le drainage en tant que composant majeur de la conception est le paramètre le plus significatif du point de vue de la stabilité sous chargements statique et dynamique. La vitesse avec laquelle les stériles se consolident pendant la construction et la sensibilité de l'ouvrage vis-à-vis de la liquéfaction dépendent presque entièrement du drainage. Si des systèmes de drainage bien adaptés ne sont pas utilisés, les résurgences sur le talus aval peuvent provoquer une érosion entraînant la rupture. Le système de drainage est également en relation avec le problème de la pollution de l'environnement provoqué, par des résurgences non contrôlées, à l'aval du barrage.

Des drainages bien conçus constituent également une bonne méthode pour construire des barrages de stériles dans des conditions sûres et économiques. Ceci nécessite une implantation et un dimensionnement adéquats des systèmes de drainage, ainsi que leur protection par des filtres aux interfaces entre zones de matériaux présentant des granulométries et perméabilités largement différentes.

Les différents types de barrage de stériles, les principales caractéristiques des stériles, les buts et avantages du drainage, ainsi que les différentes méthodes de drainage suivant les types de barrages et leurs conditions de fondations, sont examinés et discutés. Des recommandations sont proposées concernant les mesures confortatives en rapport avec les différents problèmes d'écoulement, ainsi que sur les dispositions possibles pour les drainages et les filtres.

1. INTRODUCTION

Internal drainage is of vital importance to the reliability and safety of tailings dams throughout their whole life including the operational period which commences when tailings are first deposited behind the starter dam.

Although drainage systems in the different types of tailings dams vary extensively, drainage as a major component of the design is the most significant factor in defining the stability under static and dynamic loading. The rate at which the tailings consolidate during construction and the sensitivity of the structure to liquefaction depend almost entirely on drainage. If proper drainage systems are not employed, seepage emerging on the downstream face can lead to erosion and failure. The drainage system must also address the problem of pollution of the environment caused by uncontrolled seepage emerging downstream from the dam.

Well designed drainage is a powerful method for achieving the construction of safe and economical tailings dams. It requires drains to be appropriately located and dimensioned. In addition the drains must be protected by filters at the interface between zones in which the materials have widely different gradings and permeability.

The various types of tailings dams, the main features of the properties of tailings, the purpose and benefits of drainage and the various drainage methods for different dams and foundation conditions are considered and discussed. Recommendations are made in relation to remedial measures for various seepage problems and possible drainage and filter arrangements.

2. TYPES DE BARRAGE DE STÉRILES

Les barrages de stériles sont des barrages construits avec des résidus de fabrication, des stériles miniers, des terres ou des enrochements, et sont destinés à retenir des stériles sous forme de boues et/ou d'eaux de traitement.

Lorsque le barrage n'est pas construit avec des stériles ou résidus de fabrication mais avec des stériles miniers, des terres, ou des enrochements, sa conception est fondamentalement la même que celle d'un barrage conçu pour retenir l'eau. On désigne souvent ce type de barrage de stériles comme étant du type « à retenue » d'eau.

Mais, la majorité des barrages de stériles sont construits avec des stériles ou résidus de fabrication; dans ce cas, ils se différencient par la méthode de construction retenue pour utiliser les stériles. Il y a trois techniques principales, à savoir : la méthode amont, la méthode aval, et la méthode de l'axe central, pour lesquelles des descriptions détaillées sont données dans le bulletin CIGB N° 45.

Outre les quatre types décrits ci-dessus, il existe un grand nombre de cas où des méthodes de construction mixtes sont utilisées. Ce sont les barrages de construction mixte. Il est alors essentiel de connaître les différentes méthodes utilisées pour comprendre le zonage qui en résulte ou le profil du barrage.

La méthode de construction retenue pour un site donné dépend, dans une large mesure, des propriétés des stériles (granulométrie, pourcentage de fines, teneur en argile), de la topographie (possibilité de déversements successifs à partir de plusieurs côtés), de la géologie, de la sismicité du site, du climat, de l'hydrologie, de l'écologie et de la possibilité de se procurer à bas prix des matériaux de construction pour un barrage.

Les cinq principaux types de barrage de stériles sont illustrés par les Fig. 2, 6, 23, 25 et 26 respectivement.

2. TYPES OF TAILINGS DAMS

Tailings dams are dams constructed from mill tailings, mine wastes or earth and rockfill, built for the retention of tailings slurry and/or the reclamation of slurry water.

When the dam is not built from mill tailings but from mine wastes or earth and rockfill its design will be basically similar to a dam designed for the retention of water. It is common to refer to this type of tailings dam as one of the water retention type.

By far the majority of tailings dams are constructed from mill tailings in which case they are distinguished by the construction method which is adopted to utilise the tailings in building up the dam. There are three main techniques, namely the upstream, downstream and centreline methods for which detailed descriptions are given in ICOLD Bulletin 45.

In addition to the above four types there is a large number in which a mix of construction methods is followed and these are referred to as dams of mixed construction. It is essential to know the actual mix in order to understand the resulting zoning or dam cross-section.

The method of construction selected at any site is largely determined by the properties of the tailings (grain size distribution, percent of fines and clay content), topography (possibility to spigot successively from more than one side), geology, site seismicity, climate, hydrology, ecology and the availability of low-cost materials from which to construct the dam.

The five basic types of tailings dams are illustrated below in Fig. 2, 6, 23, 25 and 26 respectively.

3. CARACTÉRISTIQUES DES STÉRILES

Tout autant que la méthode de construction, ce sont les propriétés des stériles qui différencient les barrages de stériles des barrages conventionnels pour retenue d'eau.

Les quatre principales caractéristiques des stériles qui doivent être prises en compte dans la conception des barrages de stériles et de leur drainage sont :

a) Les stériles sont des matériaux présentant une cohésion pratiquement nulle; ils sont, par conséquent, très fortement sujets à l'érosion interne et de surface. Il est donc très important d'être assuré que, moyennant un drainage approprié dans le corps de l'ouvrage, la ligne de saturation ne sort pas sur le talus aval du barrage. Outre que ce fait conduirait à une réduction de la stabilité, ceci provoquerait une érosion des stériles à moins qu'ils ne soient protégés par des matériaux drainants non érodables.

De même, lorsque l'eau de percolation s'écoule des stériles vers une zone perméable de l'ouvrage (par exemple, le remblai d'amorce perméable ou un drain posé sur la fondation) il est essentiel qu'une couche ou zone filtrante soit mise en place à l'interface pour empêcher la migration des stériles.

b) Les stériles déposés par voie hydraulique sont dans un état lâche avec une densité relative initiale d'environ 0,3 à 0,5. Pour cette densité, leur résistance au cisaillement est faible. Par suite de leur faible perméabilité, des surpressions interstitielles apparaissent au fur et à mesure de l'augmentation d'épaisseur des stériles; ceci conduit également à une réduction de la résistance au cisaillement.

c) La granulométrie et l'absence de cohésion des stériles les rendent susceptibles d'être liquéfiés sous chargement cyclique ou même à la suite d'une variation rapide du chargement statique ou de la position de la ligne phréatique.

d) A moins que les stériles ne soient mis en place sur un dépôt perméable ou qu'un drainage efficace ne soit prévu, les stériles fins déposés hydrauliquement restent saturés pendant une très longue période, si ce n'est pour toujours, et par suite de leur faible perméabilité ils se consolident lentement.

Pour ces diverses raisons, le drainage dans les barrages de stériles présente, vis-à-vis de la stabilité, une plus grande importance que dans les barrages en terre conventionnels.

3. FEATURES OF TAILINGS PROPERTIES

As well as the method of construction, it is the properties of the tailings that largely distinguish dams built using tailings from conventional water retention dams.

The four main features of tailings properties that must be considered in the design of tailings dams and their drainage are :

a) Tailings are a material with virtually zero cohesion and hence are highly susceptible to piping and surface erosion. It is therefore extremely important to ensure, through appropriate drainage within the body of the dam, that the phreatic line or seepage flow does not emerge on the downstream slope of the dam. Apart from reducing stability this would lead to erosion of the tailings unless protected by free-draining non-erodible material.

Similarly, when seepage water has to flow from the tailings into a pervious zone of the dam (for example, a pervious starter dam or an under-drain on the foundation surface), it is essential that a filter layer or zone be incorporated at the interface to prevent migration of tailing particles.

b) Hydraulically deposited tailings are rather loose with an initial relative density in the range 0.3 to 0.5. At this density shear strength is low. Due to their low permeability excess pore pressures appear with increasing height of the tailings dam and this further reduces the potential shear strength.

c) The grain size distribution and lack of cohesion of tailings make them susceptible to liquefaction under dynamic loading or even as a result of rapid change in static loading or location of the phreatic line.

d) Unless the tailings are placed over a pervious deposit or effective drainage is provided, the hydraulically deposited fine tailings remain saturated for a very long period of time, if not for ever, and because of their low permeability consolidate very slowly.

Because of these features drainage in tailings dams assumes greater importance in respect to overall stability than in conventional earthfill dams.

4. BUT DU DRAINAGE DANS LES BARRAGES DE STÉRILES

Le drainage dans les barrages de stériles vise à répondre, d'une manière aussi efficace que possible, aux objectifs suivants :

a) Abaissement de la ligne de saturation

Si une ligne de saturation basse peut être maintenue, il en résulte plusieurs effets favorables : – les écoulements ne sortent pas sur le talus aval, – la pression hydrodynamique (due à la différence des niveaux d'eau amont et aval et déterminée par le réseau d'écoulement) est réduite, – une fraction importante du barrage n'est plus saturée ce qui réduit d'autant les risques de liquéfaction sous chargement cyclique, – le matériau saturé est chargé par la masse des matériaux sus-jacents non saturés ce qui accroît la résistance vis-à-vis de la liquéfaction et la vitesse de consolidation.

b) Réduction de la pression de courant avec modification du réseau d'écoulement

Le drainage diminue la pression de courant, ce qui conduit à un réseau d'écoulement où les lignes équipotentiels tendent vers l'horizontale. Pour des lignes équipotentiels horizontales, la pression de courant est nulle même si la ligne de saturation est élevée.

c) Réduction de la pression interstitielle

La pression interstitielle, résultant de la déformation du squelette des stériles chargés par la masse des matériaux sus-jacents, est diminuée et la consolidation est accélérée par drainage. Ainsi, le drainage est conçu pour, à la fois, abaisser la ligne de saturation et obtenir un réseau d'écoulement où les lignes équipotentiels tendent vers l'horizontale.

d) Contrôle des percolations et de la non-migration des éléments des stériles

Le drainage doit être conçu pour évacuer en toute sécurité l'eau s'infiltrant à travers le corps du barrage de stériles et sa fondation. Le gradient hydraulique dans les écoulements de percolation doit être faible pour éviter toute migration des éléments des stériles, et leur passage dans les drains doit être empêché en utilisant des filtres.

Comme conséquence des points *a)*, *b)* et *c)* ci-dessus, la stabilité du barrage est augmentée, des pentes aval plus raides peuvent être réalisées, et un facteur de sécurité adéquat peut être obtenu avec une plus faible quantité de remblais.

Pour définir la solution de drainage des barrages de stériles la plus économique, il est nécessaire de comparer diverses solutions.

4. PURPOSE OF DRAINAGE IN TAILINGS DAMS

The purpose of drainage in tailings dams is to facilitate the following as efficiently as possible :

a) A Low Phreatic Surface

If a low phreatic surface can be maintained then several favourable effects are achieved : seepage does not emerge on the downstream slope; the hydrodynamic pore pressure (due to the difference of the upstream and downstream water level and determined by the hydrodynamic flow net) is reduced; a large section of the tailings dam is relieved of saturation, thereby reducing the danger of liquefaction under dynamic loading; and saturated material is loaded by the mass of the non-saturated overlying material which provides increased resistance to liquefaction and increases the rate of consolidation.

b) Reduction in Hydrodynamic Pressure Deforming the Flow Net

Drainage decreases the hydrodynamic pressure achieving a flow net in which the equipotential lines are tending toward the horizontal. At horizontal equipotential lines the hydrodynamic pressure is zero even when the phreatic line is high.

c) Reduction in Pore Pressure

The pore pressure that develops due to the deformation of the tailings skeleton loaded by the mass of the overlying material is decreased and the consolidation is accelerated by drainage. Thus, the drainage is designed to both draw down the phreatic line and achieve a flow net in which the equipotential lines are tending towards the horizontal.

d) Control of Seepage and Non-Migration of Tailings Particles

Drainage must be designed to safely remove water infiltration through the tailings dams bodies and their foundation and deliver it to the water reclaim ponds. The hydraulic gradient in seepage flows must be limited, to avoid migration of tailings particles and their passage into drains must be prevented by the use of filters.

As a consequence of *a)*, *b)* and *c)* above, dam stability is improved, steeper downstream slopes can be adopted and an adequate factor of safety can be achieved with a smaller quantity of fill material.

To achieve the most economical solution to drainage of a tailings dam it is necessary to compare various alternatives.

Comme indiqué ci-dessus, il faut prévoir, dans la conception, des filtres aux interfaces entre zones du barrage et de sa fondation présentant des perméabilités significativement différentes.

La première étape dans la conception du drainage est une étude approfondie des percolations en portant une attention toute particulière aux effets de l'hétérogénéité, de l'anisotropie et des irrégularités de forme dans les barrages de stériles. Il est nécessaire de déterminer non seulement la ligne de saturation mais, ce qui est plus important, le réseau d'écoulement; en effet, le drainage modifie beaucoup le réseau d'écoulement, réduisant ainsi la pression d'écoulement.

Le réseau d'écoulement est déterminé de façon précise et simple au moyen de l'analogie électrique ou de la méthode des éléments finis.

Le réseau d'écoulement étant établi, tous les paramètres hydrauliques peuvent être aisément déterminés, c'est-à-dire la direction de l'écoulement de percolation, les potentiels, la pression de courant, les gradients, les vitesses d'écoulement et les débits.

La pression interstitielle due à la déformation du squelette des stériles et l'effet du drainage peuvent être déterminés par la théorie de la consolidation. La spécificité de la consolidation des barrages de stériles (élévation progressive du barrage, saturation totale initiale, faible densité initiale, grande déformabilité et, de ce fait, non-linéarité des caractéristiques mécaniques, importante hétérogénéité et anisotropie) ne peut être prise en compte qu'en utilisant la méthode des éléments finis.

As stated above, filters must be incorporated in the design at the interface between zones significantly different in permeability both within the dam and its foundation.

The first step in designing the drainage system is a careful study of seepage giving special attention to the effect of nonhomogeneity, anisotropy and irregularity in shape of the tailings dam. It is necessary to determine not only the phreatic line but also, and what is even more important, the flow net itself, because drainage considerably deforms the flow net, reducing in this way once again the hydrodynamic pressure.

The flow net is most accurately (and easily) determined through electrical analogy or by means of the finite element method.

Once the flow net is available all the required hydraulic parameters can easily be determined, that is, seepage flow direction, head, hydrodynamic pressure, hydraulic gradients, flow velocity and seepage discharge.

The pore pressure due to deformability of the tailings skeleton and the effect of the drainage on it can be determined by consolidation theory. The peculiarity of the consolidation of tailings dams (gradual dam raising, initial full saturation, low initial density, great deformation and because of that nonlinearity of the mechanical features, large nonhomogeneity and anisotropy) can be taken into account only by using the finite element method of analysis.

5. DRAINAGE DANS LES DIFFÉRENTS TYPES DE BARRAGE DE STÉRILES

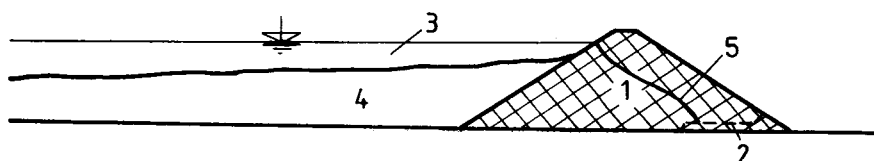
Le pourcentage de fines dans les stériles et, spécialement, la teneur en argile et les conditions du site nécessitent diverses structures et méthodes de construction des barrages de stériles. Le drainage dans les barrages de stériles dépend, dans une large mesure, de la méthode de construction; aussi est-il logique de discuter ce sujet en relation avec chaque type de barrage.

5.1. BARRAGES DE STÉRILES DU TYPE CONVENTIONNEL A RETENUE D'EAU

Ce type de barrage est fréquemment retenu, pour éviter les pertes d'effluent, lorsque les stériles sont très fins et toxiques, lorsque les contraintes écologiques sont très strictes et/ou lorsqu'une activité sismique importante est prévue.

Trois méthodes de dépôts des stériles derrière ce type de barrage sont possibles.

Premièrement, lorsque les contraintes écologiques sont très contraignantes, les stériles sont souvent déposés de telle sorte qu'ils restent toujours immergés (Fig. 1), de façon à éliminer la pollution par les poussières.



Deuxièmement, les stériles peuvent être déversés à partir du barrage vers l'amont de façon à laisser une plage non submergée au contact avec le barrage (Fig. 2). Dans ce cas, les matériaux les plus grossiers se déposent à proximité du

5. DRAINAGE IN VARIOUS TYPES OF TAILINGS DAMS

The percent of fines in the tailings and especially the clay content and the site conditions require different structures and methods of construction of tailings dams. Drainage in tailings dams depends to a significant extent on the method of construction so that it is convenient to discuss the subject in relation to each general type of dam.

5.1. TAILINGS DAMS OF WATER RETENTION TYPE

This type of dam is frequently adopted, to avoid loss of effluent, when tailings are very fine and toxic, ecological requirements are very strict and/or intensive seismic activity is anticipated.

Three methods of depositing tailings behind this type of dam are possible.

Firstly, when the ecological requirements are very strict the tailings are often deposited so that they always remain flooded to prevent dust pollution (Fig. 1).

Fig. 1

Water retention type tailings dam - Tailings always remain under water (*)

Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau - Les stériles restent toujours immergés ()*

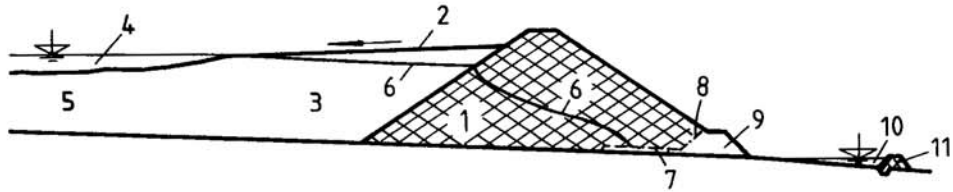
- | | |
|--|---|
| (1) Impervious earthfill dam | (1) <i>Barrage en remblai imperméable</i> |
| (2) Drain including filter (dashed line) | (2) <i>Drain incluant le filtre (ligne en tireté)</i> |
| (3) Reservoir | (3) <i>Réservoir</i> |
| (4) Tailings disposed under water | (4) <i>Stériles déposés sous l'eau</i> |
| (5) Phreatic line | (5) <i>Ligne de saturation</i> |

(*) On these and on all other figures, drains including filters are marked by dashed lines, while filters only are marked by dashed-dotted lines. The crossed out zones on the dam section indicate relatively impervious material and zones which are not marked are of relatively pervious material.

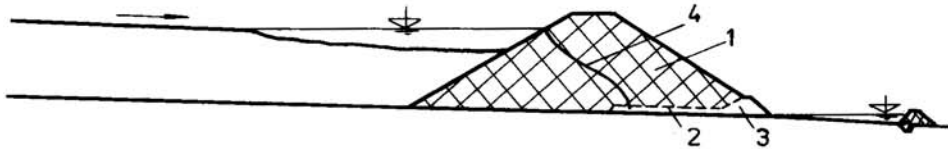
(*) *Sur cette figure et toutes les autres figures, les drains incluant des filtres sont représentés par des lignes tiretées, alors que les filtres seuls sont représentés par des lignes en trait-point. Les zones hachurées sur le profil correspondent à des matériaux relativement imperméables et les zones non hachurées à des matériaux relativement perméables.*

Secondly, the tailings may be spigotted from the dam in the upstream direction to leave a non-submerged beach adjacent to the dam (Fig. 2). In this case the coarse material is deposited next to the dam which may increase the stability of the

barrage, ce qui peut accroître la stabilité du talus amont et permettre de réaliser une pente plus raide que celle qui serait réalisée dans un barrage en remblai (terre-enrochement) conventionnel.



Troisièmement, les stériles peuvent être rejetés de l'amont vers le barrage, laissant la plage non submergée éloignée du barrage et une réserve d'eau entre cette plage et le barrage (Fig. 3). La fiabilité de cette méthode dépend de la stabilité du barrage et est plus faible, comparativement à la méthode illustrée sur la Fig. 2. La ligne de saturation est plus élevée, mais le barrage est plus bas, en raison de la pente de la plage; dans certains cas, il peut y avoir une économie dans la longueur des conduites.



Comme dans tout barrage en terre homogène conventionnel, une couche continue drainante est incorporée dans la partie aval du profil, au niveau de la fondation. Le but de ce drain, principalement lorsqu'il est associé à une cheminée drainante, est de maintenir la ligne de saturation largement à l'intérieur du profil, de façon à être assuré qu'elle n'émerge pas sur le talus aval.

La méthode de dépôt des stériles influe sur les dimensions de la couche drainante, tant du point de vue de son épaisseur que de son extension à l'amont du pied aval.

Les barrages de ce type sont souvent construits par étapes comme le montre la Fig. 4, ceci pour éviter un investissement initial important et répartir cet investisse-

upstream face and permit a steeper slope to be adopted compared with a conventional earth-rockfill dam.

Fig. 2

Water retention type tailings dam - Spigotting from the dam

Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau - Déversement à partir du barrage

- | | |
|---------------------------------|--|
| (1) Dam | (1) Barrage |
| (2) Beach | (2) Plage |
| (3) Sand | (3) Sable |
| (4) Pond | (4) Retenue |
| (5) Slimes | (5) Boues |
| (6) Phreatic line | (6) Ligne de saturation |
| (7) Drain (dashed line) | (7) Drain (ligne tiretée) |
| (8) Filter (dashed-dotted line) | (8) Filtre (ligne en trait-point) |
| (9) Toe dam | (9) Pied du barrage |
| (10) Reclaim pond | (10) Bassin de récupération |
| (11) Reclaim dam | (11) Barrage du bassin de récupération |

Thirdly, the tailings may be spigotted from the other end of the lagoon in a downstream direction towards the dam, leaving the non-submerged beach remote from the dam and the water pool between it and the dam (Fig. 3). The reliability of this method depends on the stability of the dam itself and is lower, in comparison with the method shown by Fig. 2. The phreatic line is higher, but the dam itself is lower, due to the beach inclination, and in some cases there can be a saving in pipeline length.

Fig. 3

Water retention type tailings dam - Spigotting from the far end of the reservoir

*Barrage de stériles du type conventionnel à retenue d'eau
Déversement à partir de l'extrémité amont du réservoir*

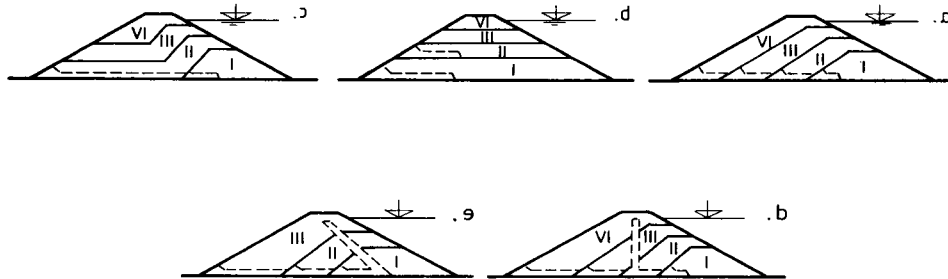
- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| (1) Nonpervious earthfill dam | (1) Barrage en remblai imperméable |
| (2) Blanket drainage | (2) Tapis drainant |
| (3) Drainage toe dam | (3) Pied de barrage drainant |
| (4) Phreatic line | (4) Ligne de saturation |

As in any normal homogeneous earthfill dam for water retention, a continuous drainage layer is incorporated in the downstream portion of the section at foundation level. The purpose of this drain, particularly when combined with a wall drain, is to keep the phreatic line well within the section thereby ensuring that it cannot reach the downstream face.

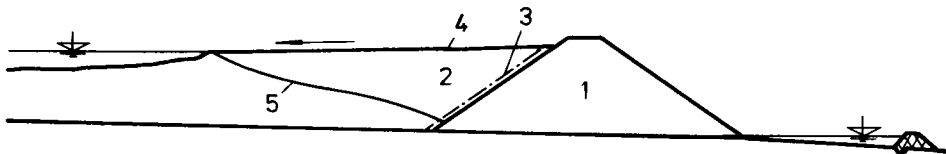
The method of depositing the tailings will affect the dimensions of the drainage layer both in terms of thickness and its length upstream of the downstream toe.

Dams of this type are often constructed in stages, as shown in Fig. 4, to avoid high initial cost and spread it over the period of tailings deposition which is

ment pendant toute la période de dépôt des stériles, qui est souvent de plusieurs années. A chaque étape, le drainage est prolongé vers l'aval.



Lorsque des matériaux drainants ou de perméabilités élevées sont facilement disponibles, il peut être économique de construire le barrage avec ces matériaux (Fig. 5). Un filtre doit être mis en place sur le talus amont pour empêcher les stériles de migrer dans le remblai perméable.



5.2. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AMONT

Ce type de barrage et la méthode de construction sont illustrés par la Fig. 6. C'est probablement la première méthode mise au point pour utiliser les stériles en tant que matériau de construction et elle est devenue une technique bien établie par suite de son coût relativement faible. Le barrage est construit en partant d'un remblai d'amorce et en déversant les stériles à partir du talus amont vers la retenue.

Une large plage non submergée est maintenue entre la zone de déversement et la retenue. Lorsque l'opération est correctement réalisée, les rejets déposent les éléments des stériles sur la plage, avec un classement granulométrique dans la direction de l'écoulement. Les particules qui se déposent à proximité des points de déversement auront normalement une dimension d'environ 2 à 3 fois le d_{50} des

often many years. As each stage is constructed the drainage layer is extended downstream.

Fig. 4

Construction stages - Homogeneous dams and dams with wall drains
Étapes de construction - Barrage homogène et barrage avec cheminée drainante

When free-draining or high permeability material is readily available it can be quite economic to construct the dam embankment from this material (Fig. 5). A filter zone must be placed on the upstream face to prevent tailings from migrating or piping into the permeable embankment.

Fig. 5

Rockfill dam
Barrage en enrochement

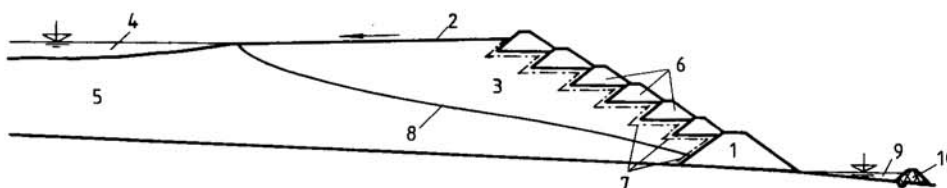
- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| (1) Rockfill | (1) <i>Enrochement</i> |
| (2) Tailings | (2) <i>Stériles</i> |
| (3) Filter | (3) <i>Filtre</i> |
| (4) Beach | (4) <i>Plage</i> |
| (5) Phreatic line | (5) <i>Ligne de saturation</i> |

5.2. TAILINGS DAMS OF UPSTREAM CONSTRUCTION

This type of dam and the construction method is illustrated in Fig. 6. It was probably the first method developed to utilise the tailings as dam construction material and has become an established technique due to its relatively low construction cost. The dam is built up by spigotting proceeding from a starter dam in the upstream direction towards the settling pond.

A wide non-submerged beach is maintained between the spigots and the pond. Spigot flow, when spigotted correctly, deposits tailings particles on the beach, grading from coarse to fine in the direction of flow. Particles deposited close to the spigot will normally be 2 to 3 times the 50 % size and have a much lower uniformity coefficient ($C_u = d_{60}/d_{10}$) than the total tailings. At 100 to 200 metres

stériles avec un coefficient d'uniformité ($C_u = d_{60}/d_{10}$) nettement inférieur à celui du matériau complet. Entre 100 à 200 m (ceci en fonction de la densité et de la pression du rejet), les particules qui se déposeront auront une dimension proche du d_{50} .



La réussite d'une telle méthode de construction suppose que l'on puisse disposer, pour assurer la stabilité, d'une plage assez large en stériles grossiers.

Le principal inconvénient de ce type d'ouvrage est dû au fait que la zone de stériles grossiers surmonte des matériaux fins (ou boues ayant tassé dans la retenue) qui se consolident lentement et présentent une faible résistance au cisaillement, ce qui limite la hauteur à laquelle le barrage peut être construit, ou entraîne la réalisation de pentes très faibles.

Cet inconvénient peut être surmonté, la stabilité accrue et la hauteur du barrage augmentée sans danger en utilisant un drainage approprié.

Dans ce type d'ouvrage, les écoulements et le drainage sont complexes, car étant fortement influencés par les hétérogénéités horizontales et verticales et les anisotropies. Ces éléments sont discutés en détail dans l'Annexe.

Pour être assuré que la ligne de saturation est située nettement à l'intérieur du profil et que la stabilité et la sécurité sont assurées, les principales dispositions concernant le drainage, mises au point pour ce type de barrage, sont rappelées ci-après.

5.2.1. Remblai d'amorce réalisé en matériau très perméable

Un remblai d'amorce construit avec un matériau de forte perméabilité (enrochement ou gravier sableux) constitue probablement la disposition la plus importante qui puisse être prise pour assurer la stabilité, car elle entraîne un drainage efficace et une ligne de saturation basse.

Un filtre est nécessaire entre les stériles et le remblai d'amorce (Fig. 5) et des précautions doivent être prises pour s'assurer que le filtre ne s'érode pas ou ne glisse pas sous l'action de la pluie ou des rejets des boues. Pour éviter ce risque, il

(depending on the slurry density and its discharge) particles deposited will be close to the 50 % size.

Fig. 6

Tailings dam of upstream construction
Barrage de stériles construit par la méthode amont

- | | |
|------------------------------|---|
| (1) Pervious starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce perméable</i> |
| (2) Beach | (2) <i>Plage</i> |
| (3) Sand | (3) <i>Sable</i> |
| (4) Pond | (4) <i>Retenue</i> |
| (5) Slimes | (5) <i>Boues</i> |
| (6) Pervious secondary dykes | (6) <i>Digues secondaires perméables</i> |
| (7) Filter | (7) <i>Filtre</i> |
| (8) Phreatic line | (8) <i>Ligne de saturation</i> |
| (9) Reclaim pond | (9) <i>Bassin de récupération</i> |
| (10) Reclaim dam | (10) <i>Barrage du bassin de récupération</i> |

The success of this construction method depends on a significantly wide beach zone of coarse tailings being established to provide stability.

The main disadvantage of this type of tailings dam is that the zone of coarse tailings overlies fine grained material (or slimes that have settled in the pond), which consolidates slowly and possesses low strength, thereby limiting the height to which the dam can be constructed or requiring very flat slopes.

This disadvantage can be overcome, the stability improved and dam height safely increased through appropriate drainage.

Seepage and drainage within a dam of this type is complex being significantly affected by nonhomogeneity both horizontally and vertically and anisotropy. These effects are discussed in detail in the Appendix.

The following main drainage features have been developed for dams of this type to ensure that the phreatic line is well within the section and that adequate stability and safety is achieved.

5.2.1. Starter Dam of High Permeability Material

A starter dam built from material with high permeability (rock fill or sandy gravel) is probably the most important single step that can be taken for achieving adequate stability by providing efficient drainage and a low phreatic line.

A filter is required between the tailings and the starter dam, as shown in Fig. 5, and care is necessary to ensure that the filter material does not erode or slump due to rainfall or spigotting and to avoid this possibility it may be necessary to flatten

peut être nécessaire d'adoucir la pente du talus amont du remblai d'amorce. L'érosion résultant des déversements peut être réduite par l'utilisation de rampes d'aspersion (dépôt sub-aérien).

Une des principales difficultés rencontrées avec la méthode de construction amont est le dépôt des éléments fins des stériles immédiatement à l'amont du remblai d'amorce.

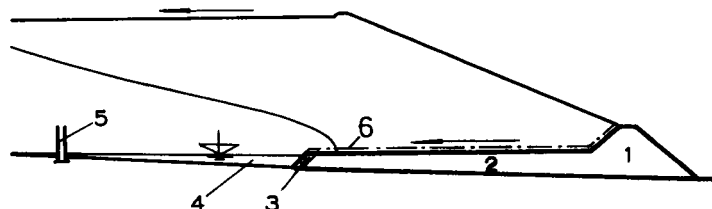
Il n'est pas prudent de considérer le remblai d'amorce comme étant le seul drain, sauf si les stériles à son contact et à une certaine distance du talus amont sont relativement grossiers.

Fréquemment, il n'est pas possible d'empêcher les stériles fins de se déposer à proximité du remblai d'amorce et une pratique très répandue consiste à mettre en place un tapis drainant à l'amont du remblai d'amorce pour drainer les matériaux fins (Fig. 7).

Cependant, lorsque le déversement commence, la retenue submerge très rapidement le tapis drainant comme le montre la Fig. 7. Jusqu'à ce que le premier évacuateur soit en fonctionnement, les boues se déposent sur le tapis drainant, ce qui peut entraîner son colmatage ou réduire sa drainance, un tapis étanche se constituant au-dessus du drain. Dans tous les cas, le tapis drainant n'assure pas la fonction pour laquelle il est prévu et il restera une zone de boue, peu drainée, de faible résistance au cisaillement, qui se consolidera lentement et constituera une fondation de qualité médiocre pour les terrains sus-jacents.



Pour assurer l'efficacité du drainage, le tapis drainant doit être construit au-dessus du niveau initial de la retenue et, en conséquence, ne jamais être submergé. Ceci peut être obtenu en donnant au tapis drainant amont une épaisseur suffisante, comme le montre la Fig. 8. Le tapis drainant se présente comme une « langue » à l'amont du remblai d'amorce.



the slope of the upstream face of the starter dam. The erosive effects of spigot flows can be reduced by the use of spray bars (sub-aerial deposition).

One of the major difficulties encountered with the upstream construction method is the deposition of fine tailings immediately upstream of the starter dam.

Reliance on the starter dam as the only drain is only advisable if the tailings in contact with it, and for some distance upstream, are comparatively coarse.

Frequently it is not possible to avoid fine tailings being placed close to the starter dam and widespread practice is to build a drainage blanket upstream of the starter dam to drain this fine material (Fig. 7).

However, when spigotting starts the settling pond very quickly submerges this drainage blanket, as shown in Fig. 7. Until the first spillway starts working, slimes deposit over the drainage blanket. This may either lead to clogging the drain or reducing drainage, as it acts as an impervious blanket over the drain. Either way the drainage blanket does not function as intended and a zone of poorly drained, low strength slimes remains to consolidate slowly and provide a poor foundation for overlying construction.

Fig. 7

Upstream blanket drainage under water

Tapis drainant amont immergé

- | | |
|---|---|
| (1) Upstream blanket drainage under water | (1) <i>Tapis drainant amont immergé</i> |
| (2) First decant tower | (2) <i>Première tour de décantation</i> |

To preserve drainage efficiency the drainage blanket needs to be built up above the initial pond level and never subsequently submerged. This can be done by constructing a pervious blanket upstream of the starter dam of sufficient height, as shown in Fig. 8. The drainage blanket is like a tongue of the upstream part of the starter dam.

Fig. 8

Improved upstream construction

Méthode améliorée de construction amont

- | | |
|--|---|
| (1) Starter dam of pervious material | (1) <i>Remblai d'amorce en matériau perméable</i> |
| (2) Upstream part of the starter dam called the "tongue" | (2) <i>Partie amont du remblai d'amorce, appelée « langue »</i> |
| (3) Sealing | (3) <i>Étanchéité</i> |
| (4) Settling pond | (4) <i>Bassin de dépôts</i> |
| (5) First decant tower | (5) <i>Première tour de décantation</i> |
| (6) Filter | (6) <i>Filtre</i> |

Ce tapis est construit avec le même matériau drainant ou un matériau similaire à celui utilisé dans le remblai d'amorce, c'est-à-dire qu'il est constitué par un matériau drainant, de résistance au cisaillement appropriée. Ce tapis doit s'étendre à l'amont de la zone de décantation pendant la phase initiale de construction et sa longueur doit être telle que la stabilité du barrage de stériles soit garantie lorsque celui-ci aura atteint sa hauteur maximale.

La surface du tapis doit avoir une inclinaison en direction de la retenue avec une pente égale à celle de la future plage, de façon à assurer un déversement et une ségrégation efficaces des stériles. Les particules les plus grossières doivent pouvoir se déposer sur tout le tapis, la fraction fine étant amenée jusqu'à la retenue, à l'amont du tapis. Les boues se déposent à l'amont du tapis drainant et ne le colmatent donc pas. Les stériles grossiers ainsi déposés auront l'angle de cisaillement le plus élevé de tous les stériles et présenteront une résistance élevée dans la zone critique des surfaces potentielles de glissement du barrage achevé.

A son extrémité amont, le tapis doit être étanché et son épaisseur doit être telle qu'une retenue de profondeur et de longueur suffisantes soit créée pour permettre le dépôt des fines pendant les premières opérations ainsi que la décantation.

Si le matériau disponible pour le tapis n'est pas assez perméable, on devra construire, sur toute ou partie de sa surface, des drains protégés par des filtres.

Après quelque temps, les stériles déposés sur le tapis formeront un écran et maintiendront élevée la ligne de saturation. Néanmoins, ce tapis sera toujours efficace, car les lignes équipotentielles au-dessus tendront vers l'horizontale et, de ce fait, la pression de courant sera faible.

La référence 3 décrit un barrage de stériles de ce type construit en Bulgarie, de 190 mètres de hauteur.

5.2.2. Remblai d'amorce réalisé en matériau de faible perméabilité

Un remblai d'amorce en matériau de faible perméabilité ne doit être réalisé que s'il n'existe aucun matériau perméable disponible. C'est une solution qui n'est pas favorable du point de vue de la stabilité et qui ne peut être retenue que pour des barrages de hauteur faible à moyenne. Si des éléments spécifiques de drainage ne sont pas inclus dans la conception, le remblai d'amorce restera saturé et la ligne de saturation sortira sur le talus au-dessus du remblai d'amorce.

Lorsque des matériaux perméables ne sont pas disponibles, on peut utiliser du remblai imperméable, par exemple des résidus miniers contenant beaucoup de terre; dans ce cas, il faut placer un drain sur le talus amont du remblai d'amorce et prolonger le système filtre/drain sur le sol sous le remblai d'amorce, avec des exutoires à intervalles donnés, de façon à évacuer les eaux de percolation (Fig. 9). Cette solution conduira à un certain abaissement de la ligne de saturation. Cependant, c'est loin d'être une solution idéale, car inévitablement, au début du dépôt des stériles, le filtre/drain sera recouvert de stériles fins (boues) en raison de l'emplacement initial de la retenue, ce qui réduit la capacité de drainage.

The tongue is constructed of the same or similar draining material to that used in the starter dam. That is, the blanket material is free draining and of appropriate strength. The blanket should extend upstream to the decant pond during initial construction and its length should be designed such that the stability of the tailings dam at its maximum height is guaranteed.

The surface of the blanket should slope towards the pond at a slope equal to that of the subsequent beach and so ensure efficient spigotting and segregation of tailings deposited by settling. Coarser particles are required to be deposited over the full length of the blanket with the fine fractions carried into the settling pond upstream of the tongue. The slimes are deposited upstream of the draining tongue, and hence do not screen or clog it. The coarse tailings deposited in this way have the highest angle of shearing resistance of all the tailings material and can develop high strength in the crucial zone on paths of potential slip surfaces in the completed dam.

At its upstream end the tongue is sealed and its thickness is made such that a pond of sufficient depth and length is created to allow for settlement of fines during initial operations and at the same time for decanting to take place.

If the available material for the tongue is not sufficiently permeable, then drains protected by filters should be built at its surface, covering a part or its whole area.

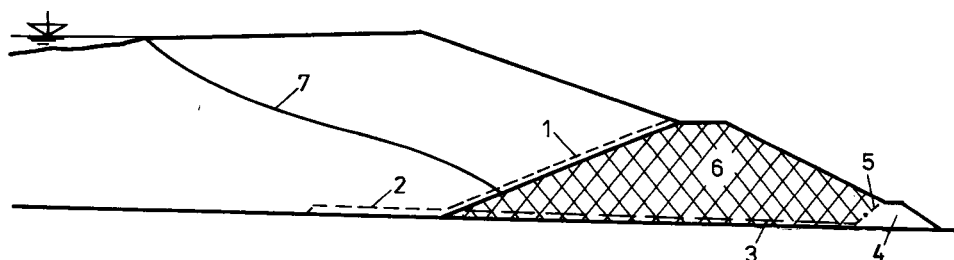
After time the deposited tailings over the tongue will screen it and keep the phreatic surface high. Nevertheless the efficacy of the tongue still remains, because the equipotential lines over it are tending towards the horizontal and as a result the hydrodynamic pressure is small.

Reference 3 describes a 190 m high tailings dam of this type of design and construction in Bulgaria.

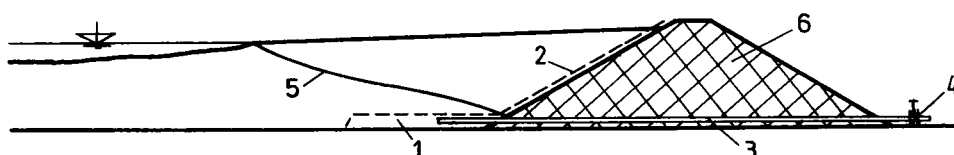
5.2.2. Starter Dam of Low Permeability Material

A starter dam built from low permeability material should only be adopted if permeable material is not readily available. It is a design solution which is unfavourable in regard to stability and is only suitable for dams of small or modest height. If specific drainage features are not incorporated in the design the starter dam will remain saturated and the phreatic line will emerge on the slope above it.

When permeable material is not available, impermeable fill can be used, for example mine waste containing much soil, on condition that a drain is placed on the upstream slope of the starter dam and the filter/drain system is extended on the ground under the starter dam with drain outlets at intervals, to lead away the seeped water as shown in Fig. 9. This arrangement will provide some lowering of the phreatic line. However, it is far from ideal as inevitably at the commencement of tailings deposition the filter/drain is covered with fine tailings (slimes) due to the initial position of the pond, which limits the drainage rate.



On peut améliorer cette solution en prévoyant des conduits, équipés de vannes, sous le remblai d'amorce (Fig. 10). Les vannes fermées permettent la création de la retenue. Par la suite, lorsque la retenue se déplace vers l'amont au fur et à mesure des dépôts de stériles, on peut ouvrir les vannes pour assurer le drainage souhaité. Afin d'éviter tous dégâts, il est recommandé de placer les conduits dans une tranchée en fondation.



Une autre solution, si la retenue est située immédiatement à l'amont du remblai d'amorce, consiste à remonter les drains à travers le barrage jusqu'à un niveau donné au-dessus des fondations. Ceci est montré par la Fig. 11. La Fig. 12 montre des variantes de ce type de disposition.

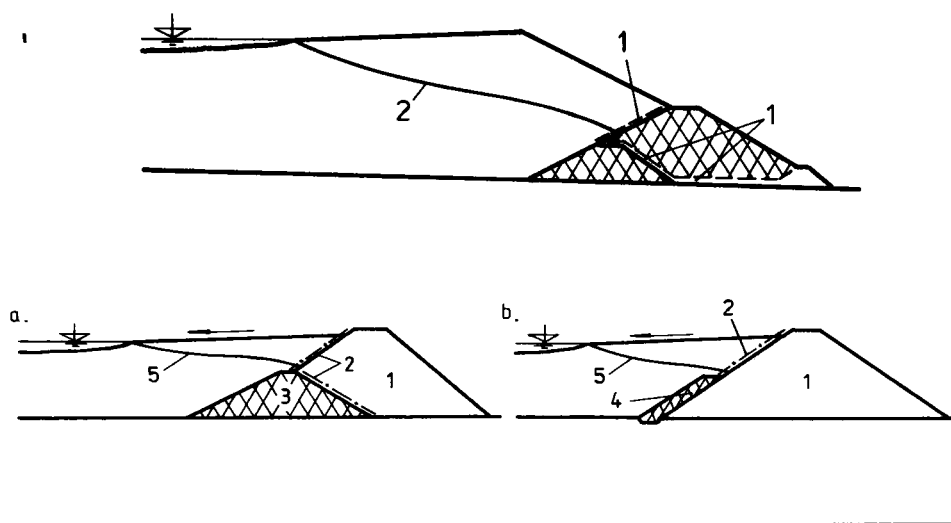


Fig. 9

Earthfill starter dam
Remblai d'amorce en terre

- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| (1) Drainage | (1) <i>Drainage</i> |
| (2) Bottom drainage | (2) <i>Drainage de fond</i> |
| (3) Drainage outlet | (3) <i>Exutoire du drainage</i> |
| (4) Drainage toe dyke | (4) <i>Pied de digue drainant</i> |
| (5) Filter | (5) <i>Filtre</i> |
| (6) Impermeable fill | (6) <i>Remblai imperméable</i> |
| (7) Phreatic line | (7) <i>Ligne de saturation</i> |

This situation can be improved by providing valved pipes under the starter dam, as shown by Fig. 10. With the valves closed the pond is retained. Subsequently, when the pond moves upstream as more tailings are deposited, the valves can be opened to provide the desired drainage. To avoid damage, it is advisable for the pipe to be placed in a trench in the foundation.

Fig. 10

Earthfill starter dam
Remblai d'amorce en terre

- | | |
|--------------------------|--|
| (1) Bottom drainage | (1) <i>Drainage de fond</i> |
| (2) Drainage | (2) <i>Drainage</i> |
| (3) Drainage outlet pipe | (3) <i>Conduit d'exhaure du drainage</i> |
| (4) Valve | (4) <i>Vanne</i> |
| (5) Phreatic surface | (5) <i>Ligne de saturation</i> |
| (6) Impermeable fill | (6) <i>Remblai imperméable</i> |

Another solution if the pond is immediately adjacent to the starter dam is to lift the drains through the dam to a specific level above the foundation, as shown in Fig. 11. Variations on this arrangement are illustrated in Fig. 12.

Fig. 11

Drain in the upper part of the starter dam
Drainage en partie haute du remblai d'amorce

- | | |
|----------------------|--------------------------------|
| (1) Drainage | (1) <i>Drainage</i> |
| (2) Phreatic surface | (2) <i>Ligne de saturation</i> |

Fig. 12

Screen on the bottom upstream part of the starter dam
Écran en partie basse du talus amont du remblai d'amorce

- | | |
|-----------------------------------|---|
| (1) Rockfill | (1) <i>Enrochement</i> |
| (2) Filter | (2) <i>Filtre</i> |
| (3) Earthfill of low permeability | (3) <i>Remblai de faible perméabilité</i> |
| (4) Impervious screen | (4) <i>Écran imperméable</i> |
| (5) Phreatic surface | (5) <i>Ligne de saturation</i> |

5.2.3. Drainage du talus aval

Les dispositifs de drainage incorporés dans le remblai d'amorce sont les plus importants du point de vue de la stabilité d'ensemble du barrage de stériles. Cependant, il est également important d'être assuré qu'il ne se produira pas de glissement local ni d'érosion du talus situé au-dessus du remblai d'amorce. Pour se prémunir contre une telle éventualité, il est essentiel qu'un drainage soit prévu dans la conception des digues situées au-dessus du remblai d'amorce. Ces digues sont normalement construites pour permettre la montée des systèmes de déversement.

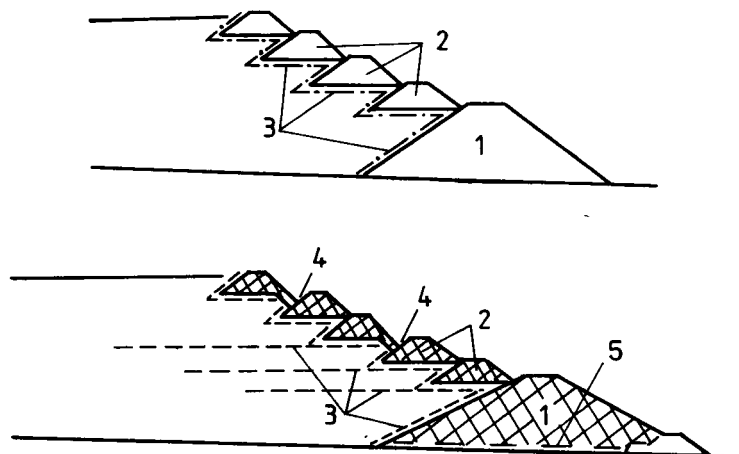
Ces digues sont, en général, construites avec les stériles déjà déposés sur la plage, surtout si la plage adjacente aux digues est constituée de sables grossiers à moyens ou de sables-graviers alluviaux. Les digues ainsi réalisées sont drainantes et ne nécessitent pas de dispositifs particuliers de drainage.

Cependant, si les stériles sont fins et ne se drainent que lentement, il est alors possible que les engins ne puissent pas circuler sur la plage pour la construction de la digue. Dans ce cas, ces digues sont construites à partir de matériaux d'emprunt. Si on utilise de l'enrochement, il est alors nécessaire de mettre en place un filtre continu sur toutes les zones de contact avec les stériles, pour empêcher les enrochements de poinçonner et pour empêcher la migration des stériles dans les digues. Cette disposition est illustrée sur la Fig. 13.

Si des résidus miniers contenant assez d'éléments fins pour agir comme filtres sont disponibles, on peut les utiliser pour les digues secondaires sans filtres.

Si les digues sont construites en matériau argileux, un drainage est alors nécessaire entre l'argile et les stériles (Fig. 14). Cette disposition inclut fréquemment des fossés de collecte au-dessus du remblai d'amorce, espacés tous les 2 à 3 digues, ceci pour collecter les eaux de ruissellement et les eaux de drainage.

L'installation des drains (3) nécessite une plage sèche. Si ce n'est pas possible et si les matériaux des drains ne peuvent être mis en place mécaniquement, ils seront épandus par voie hydraulique, en utilisant des déversements soigneusement contrôlés des stériles cyclonés au moyen de boues de faible densité, afin d'assurer un épandage uniforme de la couche drainante.



5.2.3. Downstream Face Drainage

The drainage features incorporated in the starter dam are the most important in regard to achieving adequate overall stability of the tailings dam. However, it is also important to ensure that local slumping and erosion of the slope above the starter dam does not occur and to guard against this possibility it is essential that drainage forms part of the design of the dyke system above the starter dam. Dykes are normally built to accommodate each raising of the spigotting pipeline.

The dykes are commonly built-up from tailings already deposited on the beach particularly when the beach adjacent to the dykes is coarse to medium sized sand or alluvial sand-gravel mixture. Dykes made of these materials are free draining and do not require any particular drainage measures.

However if the tailings are fine-grained and drain only slowly then it is possible that construction equipment may not be able to run on the beach for dyke construction even after being given some time to dry. In this case the dykes are built from a borrowed material. If rockfill is used it is necessary to provide a continuous filter at all contact with the tailings, firstly, to prevent the rocks from sinking and secondly, to prevent migration of tailings into the dykes. The arrangement is illustrated in Fig. 13.

If mine waste containing sufficient fines to act as a filter for the tailings is available, this can be used for the secondary dykes without the filters.

If dykes are built from clayey material, drainage is required between the clay and the tailings (Fig. 14). This arrangement frequently incorporates collector ditches above the starter dam at two or three dyke intervals, as shown, to collect both rain and drainage water.

The installation of the drains (3) requires a dry beach. If this is not possible and drain material cannot be placed mechanically, it should be spread hydraulically using carefully controlled spigotting of cycloned tailings by slurry of low density to ensure a uniform spread of the drain layer.

Fig. 13

Starter dam and dykes of permeable material
Remblai d'amorce et digues en matériau perméable

- | | |
|------------------------------|--|
| (1) Rockfill starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce en enrochement</i> |
| (2) Rockfill secondary dykes | (2) <i>Digues secondaires en enrochement</i> |
| (3) Filter | (3) <i>Filtre</i> |

Fig. 14

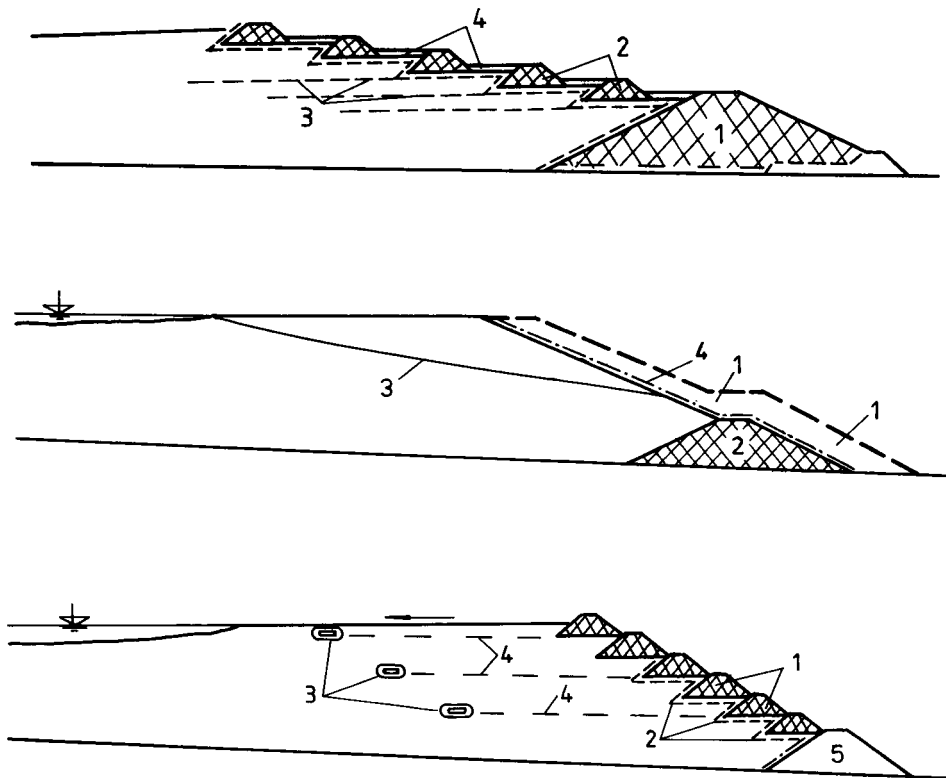
Starter dam and dykes of impermeable material
Remblai d'amorce et digues en matériau imperméable

- | | |
|---------------------------------|--|
| (1) Nonpervious starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce non perméable</i> |
| (2) Nonpervious secondary dykes | (2) <i>Digues secondaires non perméables</i> |
| (3) Drains | (3) <i>Drains</i> |
| (4) Catch ditch | (4) <i>Fossé collecteur</i> |
| (5) Drain outlet | (5) <i>Exutoire du drainage</i> |

Lorsque le barrage est construit avec des stériles très fins, il faut prévoir un talus aval de pente douce pour maintenir une stabilité d'ensemble satisfaisante. Dans ce cas, les drains et filtres peuvent être construits en même temps que les digues en argile comme le montre la Fig. 15.

Lorsque cela est justifié économiquement, on peut constituer, au lieu de digues secondaires, une surcharge en talus aval (Fig. 16), en même temps que le dépôt de stériles s'élève.

Toujours dans le cas de stériles très fins, il peut être possible d'augmenter la pente aval en incorporant des bandes drainantes à une certaine distance à l'amont, ces bandes étant parallèles aux digues comme le montre la Fig. 17. Ces bandes drainantes sont constituées de graviers drainants enrobés dans un sable filtre ou un géotextile.



Le rejet des stériles latéralement à partir des appuis du barrage, pour réaliser des couches de matériau sableux au-delà de la limite amont de la plage, constitue une autre méthode pour réaliser des drains qui ont presque la même fonction que les bandes drainantes.

Une seconde solution, plus efficace, consiste à réaliser des drains verticaux continus, interconnectés avec des exutoires horizontaux discontinus régulièrement

When the dam is built of very fine tailings a flat downstream slope is required in order to maintain sufficient overall stability. In this case filters and drains can be built up together with clay dykes as shown in Fig. 15.

When economically justified, instead of secondary dykes the downstream slope can be surcharged with mine waste, as shown by Fig. 16, simultaneously with the rise of the tailings disposal.

Again in the case of fine tailings it may be possible to steepen the otherwise flat downstream slope by incorporating strip drains some distance upstream of, and parallel to, the dykes, as shown in Fig. 17. These drains are made of free draining gravel surrounded by a sand filter or geotextile.

Fig. 15

Impermeable dykes at a flatter slope
Digues imperméables suivant une pente plus faible

- | | |
|---------------------------------|--|
| (1) Nonpervious starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce non perméable</i> |
| (2) Nonpervious secondary dykes | (2) <i>Digues secondaires non perméables</i> |
| (3) Drains | (3) <i>Drains</i> |
| (4) Overburden | (4) <i>Surcharge</i> |

Fig. 16

Nonpervious starter dam
Remblai d'amorce non perméable

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| (1) Permeable material | (1) <i>Matériau perméable</i> |
| (2) Nonpermeable material | (2) <i>Matériau non perméable</i> |
| (3) Phreatic line | (3) <i>Ligne de saturation</i> |
| (4) Filter | (4) <i>Filtre</i> |

Fig. 17

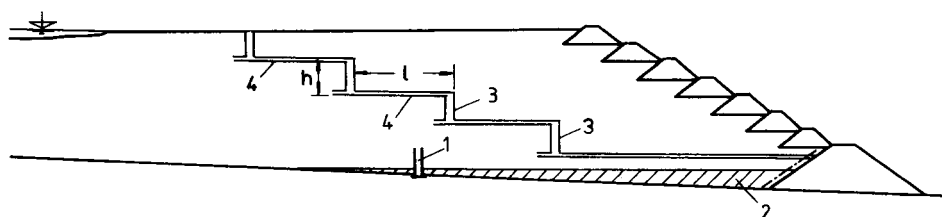
Use of strip drains
Utilisation de bandes drainantes

- | | |
|---------------------------------|--|
| (1) Impermeable secondary dykes | (1) <i>Digues secondaires imperméables</i> |
| (2) Drains | (2) <i>Drains</i> |
| (3) Strip drains | (3) <i>Bandes drainantes</i> |
| (4) Drainage outlets | (4) <i>Exutoires du drainage</i> |
| (5) Pervious starter dam | (5) <i>Remblai d'amorce perméable</i> |

Spigotting sideways from the abutments to produce layers of sand size material spreading beyond the upstream limit of the beach is another method of providing drains, which have almost the same function as the strip drains.

A second and more efficient alternative consists of interconnected continuous vertical drains with discrete horizontal outlets spaced at specified intervals, as

espacés (Fig. 18). Les drains verticaux sont construits en excavant une tranchée et en remplaçant les stériles fins par du sable grossier à moyen qui se comporte à la fois comme filtre et drain. Comparables aux drains cheminées dans les barrages conventionnels, l'ensemble des drains verticaux intercepte tous les écoulements suivant des passages horizontaux. Les drains horizontaux formant exutoires doivent être espacés et dimensionnés pour permettre d'acheminer les débits de fuites jusqu'au pied aval.



L'espacement horizontal « l » des drains verticaux dépend des conditions d'accès sur la plage pour l'excavateur et les camions. La dessiccation de cette plage est nécessaire pour qu'un trafic puisse être envisagé.

La hauteur « h » des drains verticaux dépend de la profondeur qui peut être atteinte par l'excavateur, mais elle est généralement limitée par la hauteur de talus stable sans soutènement dans le dépôt; la granulométrie et la teneur en eau des stériles sont les facteurs déterminants. Afin de réduire la longueur non soutenue, le remblaiement en sable doit suivre au plus près l'excavation.

La construction des drains, filtres et digues secondaires peut être grandement facilitée lorsqu'il existe d'autres lagunes, de sorte que l'on peut attendre plus longtemps pour la dessiccation de la plage de barrage. Pour les barrages de stériles montés à partir de deux ou plusieurs côtés, on obtient le même effet lorsqu'on déverse successivement sur des côtés opposés ou à divers endroits sur une grande plage de déversement.

5.2.4. Le cyclonage

La fraction sableuse grossière obtenue par cyclonage des stériles fournit un matériau idéal pour la construction de la recharge aval d'un barrage de stériles. Elle peut servir simultanément de filtre et de drain à la fois vis-à-vis du matériau complet et de sa fraction très fine obtenue en sortie de cyclone.

Ce matériau est utilisé pour la construction des digues (Fig. 19) et permet de réaliser une risberme de pied formant contrepoids, tel qu'illustré par la Fig. 20, lorsque des dispositions confortatives sont nécessaires pour augmenter la stabilité d'ensemble.

Avec l'augmentation de hauteur des barrages de stériles, la zone de stockage augmente et il est possible que la quantité de sable cyclonée disponible soit supérieure à la quantité nécessaire à la construction des digues. Ceci permet alors d'interrompre de temps en temps la procédure de cyclonage et de reprendre la mise

shown in Fig. 18. The vertical drains are constructed by trenching and replacing the fine tailings with coarse to medium sized sand material which acts as both a filter and drain. Similar to wall drains in water retention dams the series of vertical drains intercept all seepage along horizontal paths. The horizontal outlet drains must be spaced and sized to convey all seepage to the downstream toe.

Fig. 18

Use of wall and blanket drains

Utilisation de drain cheminée et tapis drainant

- | | |
|--|--|
| (1) First decant tower | (1) <i>Première tour de décantation</i> |
| (2) Fine sediment from initial operation stage | (2) <i>Sédiment fin provenant du remplissage initial</i> |
| (3) Vertical parts of the drainage | (3) <i>Éléments verticaux de drainage</i> |
| (4) Horizontal parts of the drainage | (4) <i>Éléments horizontaux de drainage</i> |

The horizontal separation “l” of the vertical drains depends on what access is feasible for the trench excavator and truck on the beach. Drying out of the beach is necessary before any trafficking by equipment.

The height “h” of the vertical drains depends on the depth the excavator can reach but is normally limited by what free standing height is possible for the excavated trench walls; grain size and moisture content of the tailings will be the controlling factors. To minimise the length of unsupported trench, backfilling with sand must follow the excavator closely.

The construction of drains, filter and secondary dykes can be greatly assisted when there are alternative lagoons so that more time can be given for beach drying at each dam. At tailings dams dyked from two or more sides, the same effect is obtained when spigotting consecutively on the opposite sides, or at different parts of a large spigotting length.

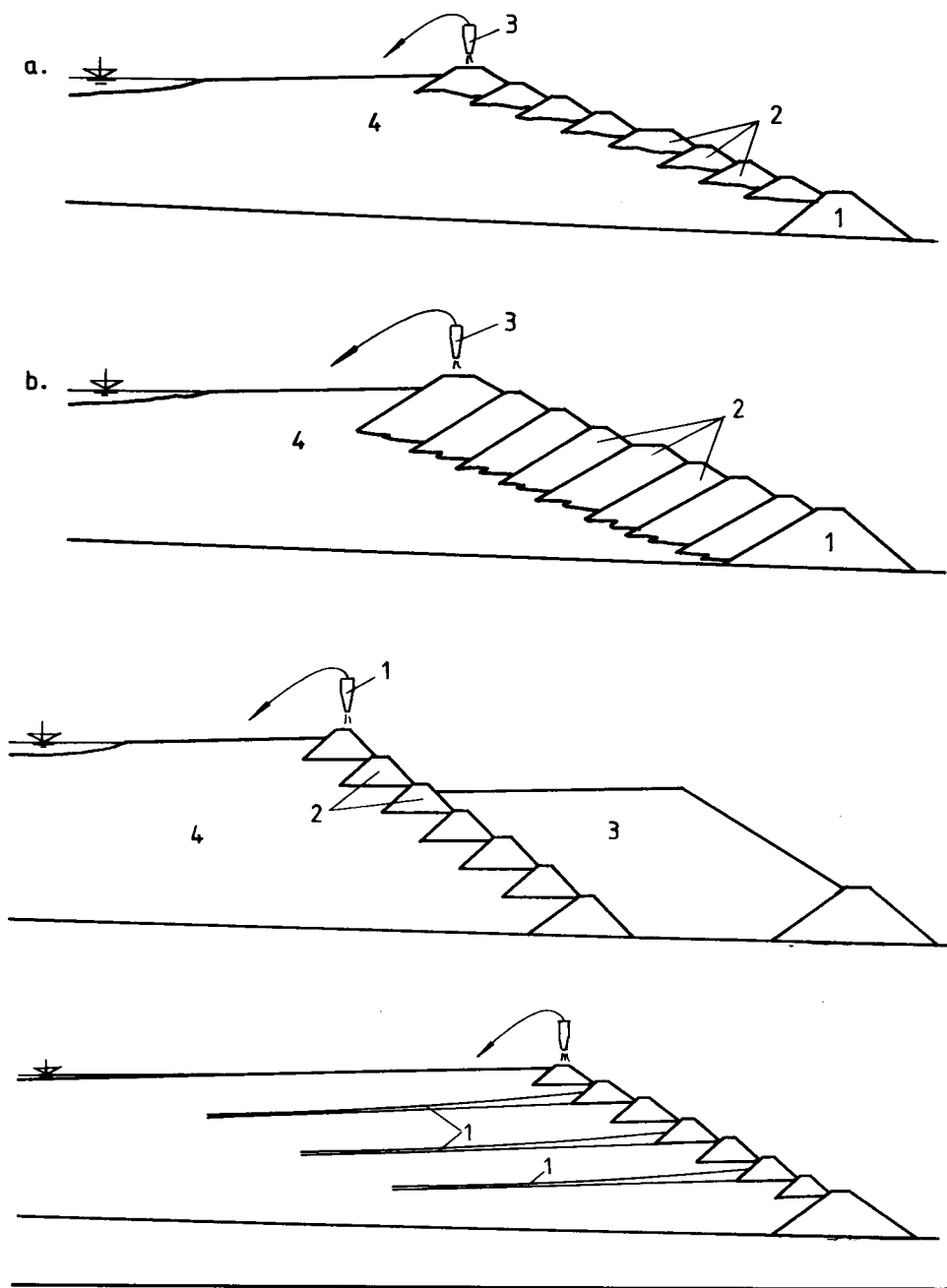
5.2.4. Cycloning

The coarse grained sand fraction obtained from cycloning the tailings provides an ideal material for constructing the downstream zone of a tailings dam. It can serve simultaneously as a filter and drain to both the total tailings and to the very fine grained overflow fraction from the cyclone.

The cycloned sand is used for dyke construction (Fig. 19), and for providing suitable material for a toe weighting berm, as shown in Fig. 20, when remedial measures are required to improve overall stability.

With increasing height of tailings dam the storage area increases and more cycloned sand may be available than is required for dyke construction. This provides the opportunity to interrupt the cycloning procedure at intervals and carry out a spigotting operation of the total tailings to create tongue layers of coarser

en place par rejet de l'ensemble des stériles; on peut ainsi créer des tapis de matériaux plus grossiers comme le montre la Fig. 21. Ces couches qui agissent comme des drains sont particulièrement utiles pour accélérer la consolidation des boues à proximité du talus aval. Elles fonctionnent ainsi de façon tout à fait comparable aux dispositifs de drainage examinés ci-dessus, et illustrés par les Fig. 14, 15, 17 et 18.



grained material as shown in Fig. 21. These layers function as drains and are particularly useful in accelerating consolidation of slimes close to the downstream face. Thus they function in a similar way to drainage features discussed above and illustrated in Fig. 14, 15, 17 and 18.

Fig. 19

Cycloned sand secondary dykes
Digues secondaires en sable cycloné

- | | |
|--|--|
| (a) Low sand percentage in the tailings | (a) <i>Faible pourcentage de sable dans les stériles</i> |
| (b) High sand percentage in the tailings | (b) <i>Fort pourcentage de sable dans les stériles</i> |
| (1) Starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce</i> |
| (2) Secondary dam of cycloned sand | (2) <i>Remblai secondaire en sable cycloné</i> |
| (3) Hydrocyclone | (3) <i>Hydrocyclone</i> |
| (4) Slimes - cyclone overflow | (4) <i>Boues - Évacuation supérieure du cyclone</i> |

Fig. 20

Use of cycloned sand as remedial toe weighting
Utilisation de sable cycloné en recharge stabilisatrice

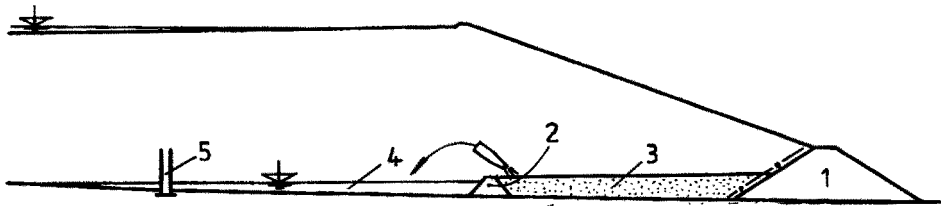
- | | |
|-----------------------------------|--|
| (1) Hydrocyclone | (1) <i>Hydrocyclone</i> |
| (2) Cycloned sand secondary dykes | (2) <i>Digues secondaires en sable cycloné</i> |
| (3) Cycloned supporting part | (3) <i>Recharge en matériau cycloné</i> |
| (4) Slime - Cyclone overflow | (4) <i>Boue - Évacuation supérieure du cyclone</i> |

Fig. 21

Combined cycloning and spigotting procedure
Combinaison des procédés de cyclonage et de déversement

- | | |
|--------------------------------|---|
| (1) Spigotted layers as drains | (1) <i>Couches déversées pour former des drains</i> |
|--------------------------------|---|

Une couche drainante au niveau de la fondation, telle que représentée sur la Fig. 8, peut aussi être réalisée avec des stériles cyclonés, comme illustrée par la Fig. 22, en remplissant l'espace situé entre le remblai d'amorce et un second remblai d'amorce amont avec la fraction grossière cyclonée et en déchargeant les refus du cyclone directement dans la retenue située à l'amont du deuxième remblai.



Si la granulométrie des stériles fournis, la densité et la quantité de pulpe changent sans arrêt, beaucoup d'éléments fins passeront dans le sable cycloné. Il est alors préférable que le sable cycloné destiné aux filtres soit déchargé préalablement sur une aire provisoire, de façon que les essais d'assurance de la qualité puissent être réalisés en vue de vérifier que le matériau présente des caractéristiques appropriées de perméabilité et de granulométrie.

Une insuffisance d'éléments grossiers dans les stériles peut se présenter lorsqu'on utilise des cyclones pour extraire du sable servant de matériau de remblais dans les mines souterraines. Dans ce cas, il peut s'avérer nécessaire d'extraire des sables naturels pour constituer les filtres et les drains. S'il y a diverses catégories de sable dans les stériles, il peut être possible de les isoler par double cyclonage. Il faut ajouter de l'eau au refus du premier cyclone avant de l'introduire dans le second cyclone. Ce procédé est coûteux et peut ne pas produire un volume suffisant de sable pour les drains. L'extraction de sables naturels dans des zones d'emprunt, même si les distances de transport sont grandes, peut être la solution la plus économique.

5.3. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AVAL

La méthode aval de construction des barrages de stériles est illustrée sur la Fig. 23. De même que les barrages conventionnels en enrochement avec masque d'étanchéité amont, les barrages de stériles construits par la méthode aval sont extrêmement sûrs et ne présentent pas de limitation de hauteur, même dans les zones de forte sismicité.

Le sable constituant le barrage est obtenu par cyclonage, les refus du cyclone étant déversés dans la retenue, immédiatement à l'amont du barrage. Le matériau constitutif de l'ouvrage étant drainant ou de perméabilité élevée, les dispositifs de drainage au niveau de la fondation sont réduits au minimum; ils peuvent être simplement constitués par une couche drainante partant du remblai d'amorce jusqu'au pied aval ou par un réseau de tranchées drainantes dans la fondation. Les

An effective drainage tongue at foundation level, as shown in Fig. 8, can also be obtained with cycloned tailings, as illustrated in Fig. 22, by filling between the starter dam and an upstream secondary starter dyke with the coarse cycloned fraction and discharging the cyclone overflow directly into the pond on the upstream side of the secondary dyke.

Fig. 22

Drainage tongue of cycloned sand

Tapis drainant en sable cycloné

- | | |
|-----------------------------------|---|
| (1) Starter dam of pervious fill | (1) <i>Remblai d'amorce en matériau perméable</i> |
| (2) Second dam of impervious fill | (2) <i>Second remblai en matériau imperméable</i> |
| (3) Tongue of cycloned sand | (3) <i>Tapis de sable cycloné</i> |
| (4) Settling pond | (4) <i>Bassin de décantation</i> |
| (5) First decant tower | (5) <i>Première tour de décantation</i> |

If the grain size of the delivered tailings and the pulp density and quantity steadily change, a lot of fines will pass into the cycloned sand. It is then preferable that cycloned sand to be used for filters should be discharged beforehand on a temporary area, so that quality assurance testing can be performed, to ensure that the material has the adequate permeability or grain size properties.

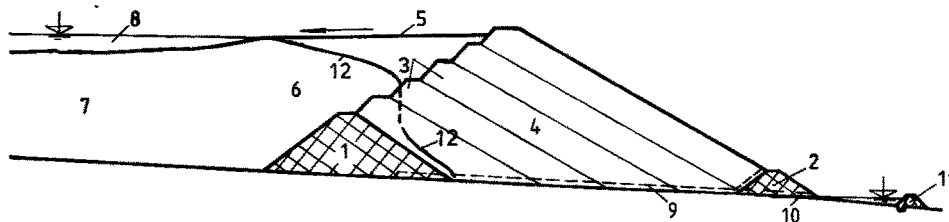
A shortage of coarse fraction in the tailings may be caused when cyclones are used in the processing plant to extract sand for use as backfilling in underground mines. In these cases it may be necessary to borrow natural sands for the filters and drains. If there are any sand sizes in the tailings, it may be possible to isolate them by double cycloning. The underflow from the first cyclone has water added and it is put through a second cyclone. This process is expensive and it may not produce sufficient volume of sand for the drains. Then borrowing natural sands, even if the haul distances are considerable, may be the most economic solution.

5.3. TAILINGS DAMS OF DOWNSTREAM CONSTRUCTION

The so called downstream method of tailings dam construction is illustrated in Fig. 23. Like water retention dams of rockfill with an impervious membrane on the upstream face, tailings dams so constructed are extremely safe and require no restrictions on height even in areas of high seismicity.

The sand constituting the dam is obtained from cyclone operations with cyclone overflow being discharged into the tailings storage immediately upstream of the dam. With the dam material being free draining or of high permeability, minimal drainage features are required at foundation level and may consist simply of a drainage layer from the starter dam to the downstream toe or a network of finger drains trenched into the foundation. Settlement of the dam embankment can

tassements du barrage peuvent être minimisés et la résistance au cisaillement du matériau augmentée en compactant le sable par couche au moyen de rouleaux vibrants. Si cela se justifie économiquement, la construction peut être facilement contrôlée pour fournir un remblai de grande qualité (Réf. 12, 14, 17, 20, 26).



Au démarrage des opérations, un matériau perméable provenant d'une zone d'emprunt peut être nécessaire pour compléter une fourniture insuffisante de sable cycloné.

Les mesures spécifiques de drainage nécessaires pour ce type de barrage, particulièrement au-dessus du niveau de fondation, dépendent de la granulométrie et de la perméabilité du sable cycloné. Il est de bonne pratique de drainer l'ensemble de la fondation de la section en sable cycloné comme le montre la Fig. 23. Des drains situés sous la couche drainante peuvent être nécessaires; ils doivent être mis en place dans des tranchées de faible profondeur sous la fondation.

Si la surface de fondation est irrégulière, un réseau de drains correctement espacés sur toute l'emprise doit être envisagé plutôt qu'une couche drainante continue. Ces drains doivent être protégés pour éviter d'être endommagés par les matériels de terrassement et doivent par conséquent être mis en place dans des tranchées et entourés de graviers comme le montre la Fig. 36.

La digue de pied aval peut être construite en matériau perméable ou imperméable dans la mesure où elle est construite sur une couche drainante de fondation. Lorsque le choix est possible, un matériau perméable, de plus grande résistance au cisaillement, doit être préféré.

Si l'alimentation en eau de la station de traitement provient de l'eau retenue par le remblai d'amorce, le barrage doit être imperméable au moins jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de laquelle il peut être perméable (Fig. 24).

Le compactage des sables cyclonés se traduira non seulement par un matériau remarquablement rigide mais entraînera également une réduction de leur perméabilité qui, si elle est trop faible, peut alors nécessiter un drainage comme illustré par la Fig. 17.

be decreased and material strength increased by compacting the sand in layers using vibrating rollers. If economically justified, construction is easily controlled to provide high quality fill (ref. 12, 14, 17, 20, 26).

Fig. 23

Tailings dam of downstream construction
Barrage de stériles construit par la méthode aval

- | | |
|--|--|
| (1) Impervious starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce imperméable</i> |
| (2) Impervious toe dam | (2) <i>Pied de barrage imperméable</i> |
| (3) Secondary dyke | (3) <i>Digue secondaire</i> |
| (4) Cycloned sand | (4) <i>Sable cycloné</i> |
| (5) Beach | (5) <i>Plage</i> |
| (6) Coarsest fractions of cyclone overflow | (6) <i>Fractions les plus grossières de l'évacuation supérieure du cyclone</i> |
| (7) Slimes | (7) <i>Boues</i> |
| (8) Pond | (8) <i>Retenue</i> |
| (9) Blanket drainage | (9) <i>Tapis drainant</i> |
| (10) Drainage outlet | (10) <i>Exutoire du drainage</i> |
| (11) Reclaim dam | (11) <i>Barrage du bassin de récupération</i> |
| (12) Phreatic line | (12) <i>Ligne de saturation</i> |

During initial operations borrowed pervious material may be needed to supplement an inadequate supply of cycloned sand.

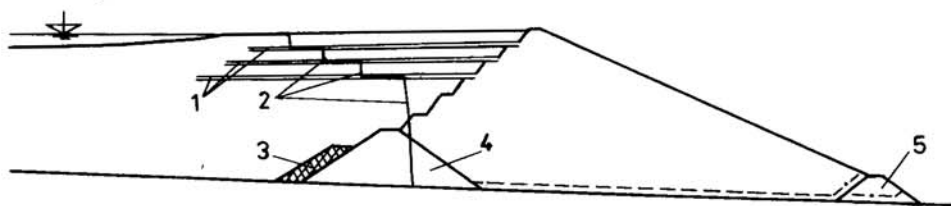
Specific drainage measures required in this type of dam, particularly above foundation level, depend on the grain size and permeability of the cycloned sand. It is good practice to drain the whole foundation surface of the cycloned sand section, as shown in Fig. 23. Piped outlets located under the drainage layer may be necessary and should be laid in shallow trenches in the foundation surface.

If the foundation surface is hilly, a network of finger drains well spaced over the whole area should be designed instead of a continuous drainage layer. They require protection against being washed away and from damage by earthmoving equipment and hence should be laid in trenches and surrounded with gravel as shown in Fig. 36.

The downstream toe dyke may be constructed from either pervious or impervious material provided it is underlain by the foundation drainage layer. Where there is a choice pervious material with higher strength is to be preferred.

If the water supply for the treatment plant is to come from water retained by the starter dam, this structure needs to be impervious at least to a selected height above which it may be permeable, as indicated in Fig. 24.

Compaction of cycloned sand in layers will not only make it remarkably rigid but also reduce its permeability which, if too low, may conceivably need to be drained as illustrated in Fig. 17.



Lorsqu'aucun compactage mécanique n'est utilisé, des tassements importants du remblai se produiront pendant la construction et tous les drains construits à des niveaux intermédiaires devront être soigneusement conçus de façon que leur fonctionnement ne soit pas entravé par les déformations qui se produiront.

Si, à partir d'une certaine hauteur, il est produit plus de sable que nécessaire pour la construction du barrage, il peut être avantageux d'arrêter périodiquement le cyclonage et de mettre en place par déversement dans la retenue l'ensemble des stériles. Ceci entraînera la constitution de couches drainantes et un abaissement complémentaire de la ligne de saturation comme le montre la Fig. 24.

En général, les digues de pied seront constituées de matériaux perméables. Si de tels matériaux ne sont pas disponibles, elles peuvent être construites en matériaux imperméables, mais, dans ce cas, des drains sont nécessaires (Fig. 23 et 25).

5.4. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE DE L'AXE CENTRAL

Dans la méthode de construction amont, la crête se déplace vers l'amont au fur et à mesure de l'augmentation de hauteur, tandis que dans la méthode aval la crête se déplace vers l'aval.

Aussi, comme son nom l'indique, dans les barrages construits par la méthode de l'axe central, la crête reste dans un plan fixe comme le montre la Fig. 25. Les méthodes de drainage dans ce type d'ouvrage sont les mêmes que pour les barrages de stériles construits par la méthode aval.

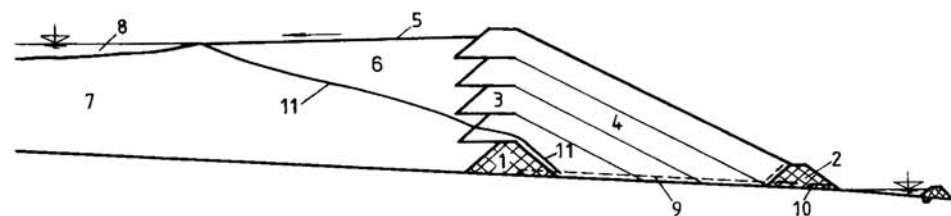


Fig. 24

Tailings dam of downstream construction
Barrage de stériles construit par la méthode aval

- | | |
|---------------------------|---|
| (1) Spigotted sand layers | (1) Couches de sable mises en place par déversement |
| (2) Phreatic line | (2) Ligne de saturation |
| (3) Sealing | (3) Étanchéité |
| (4) Pervious starter dam | (4) Remblai d'amorce perméable |
| (5) Pervious toe dam | (5) Pied du barrage perméable |

When no mechanical compaction is used considerable settlement of the embankment will occur during construction and any drains built at intermediate levels will have to be carefully designed so that their function is not destroyed by the deformations that take place.

If above a particular height more sand is produced than is needed for the embankment it may be advantageous to cease cycloning periodically and spigot the total tailings into the storage. This will produce drainage layers and lower the phreatic line even more, as shown in Fig. 24.

In general, toe dams should be built of pervious material. If such material is not available, they can be built from impermeable ones, but in this case drains are necessary, as shown on Fig. 23 and 25.

5.4. TAILINGS DAMS OF CENTRELINE CONSTRUCTION

In upstream construction the crest moves upstream as the height increases while in downstream construction the crest moves downstream.

Thus, as its name implies, in tailings dams of centreline construction the crest remains in a fixed plan position as shown in Fig. 25. The drainage methods in these structures are the same as in the downstream construction type of tailings dam.

Fig. 25

Tailings dam of centreline construction
Barrage de stériles construit par la méthode de l'axe central

- | | |
|---|--|
| (1) Impervious starter dam | (1) Remblai d'amorce imperméable |
| (2) Pervious or impervious toe dam | (2) Pied du barrage perméable ou imperméable |
| (3) Secondary dykes of cycloned sand or borrowed fill | (3) Digues secondaires en sable cyclonné ou en remblai d'apport |
| (4) Cycloned sand | (4) Sable cyclonné |
| (5) Beach | (5) Plage |
| (6) Coarsest fractions of cyclone overflow | (6) Fraction la plus grossière de l'évacuation supérieure du cyclone |
| (7) Slimes | (7) Boues |
| (8) Pond | (8) Retenue |
| (9) Blanket drainage | (9) Tapis drainant |
| (10) Drainage outlet | (10) Exutoire du drainage |
| (11) Phreatic line | (11) Ligne de saturation |

5.5. BARRAGES DE STÉRILES DE CONSTRUCTION MIXTE

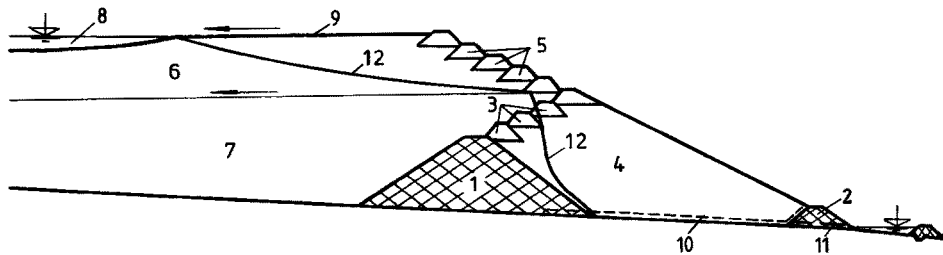
Pendant la construction des barrages de stériles, les conditions peuvent varier et entraîner une modification de la méthode de construction.

En fonction de la granulométrie des stériles et des dimensions du barrage aval, il peut être possible et économiquement valable d'arrêter à un certain niveau le cyclonage et de procéder par rejet comme dans le mode de construction amont. Ceci est illustré par la Fig. 26. Un tel barrage est dit de construction mixte.

Par exemple, à des cotes plus élevées, les surfaces plus importantes disponibles pour le dépôt et le tassement des stériles peuvent permettre la réalisation de plages plus étendues et on peut décider de passer d'une construction par la méthode aval à une construction par la méthode amont plus économique.

Aussi, est-il tout à fait possible et valable de commencer la construction des barrages de stériles avec un remblai d'amorce relativement haut, assimilable à un barrage conventionnel, puis de continuer avec la méthode aval et finalement de passer à la méthode amont.

La conception du drainage doit tenir compte de toutes les étapes et de la méthode de construction retenue.



5.5. TAILINGS DAMS OF MIXED CONSTRUCTION

Conditions may vary during particular periods of tailings dam construction which give rise to change in the method of construction.

Depending on the grain size distribution of the tailings and the dimensions of the downstream embankment it may be possible and economic at some level to cease cycloning altogether and proceed with spigotting as in upstream construction, as shown in Fig. 26. Such a dam is said to be of mixed construction.

For example, at higher levels increased area for deposition and settlement of the tailings allow more extensive beaches to be maintained and a decision to change from downstream to the more economical upstream construction could be taken.

Thus it is quite possible and reasonable to commence building a tailings dam with a relatively high starter dam similar to a water retention dam, then to continue with downstream construction and finally change to upstream construction.

Drainage considerations and design must take account of each stage and the construction method adopted.

Fig. 26

Tailings dam of mixed construction
Barrage de stériles de construction mixte

- | | |
|--|---|
| (1) High starter dam of impervious material | (1) <i>Remblai d'amorce de grande hauteur en matériau imperméable</i> |
| (2) Pervious or impervious toe dam | (2) <i>Pied de barrage perméable ou imperméable</i> |
| (3) Secondary dykes of downstream construction | (3) <i>Digues secondaires construites par la méthode aval</i> |
| (4) Cycloned sand | (4) <i>Sable cycloné</i> |
| (5) Secondary dykes of upstream construction | (5) <i>Digues secondaires construites par la méthode amont</i> |
| (6) Spigotted tailings | (6) <i>Stériles déversés</i> |
| (7) Spigotted slimes | (7) <i>Boues déversées</i> |
| (8) Pond | (8) <i>Retenue</i> |
| (9) Beach | (9) <i>Plage</i> |
| (10) Blanket drainage | (10) <i>Tapis drainant</i> |
| (11) Drainage outlet | (11) <i>Exutoire du drainage</i> |
| (12) Phreatic line | (12) <i>Ligne de saturation</i> |

6. DRAINAGE DANS LE CAS DE FONDATIONS PERMÉABLES

Deux cas principaux de fondations perméables sont considérés.

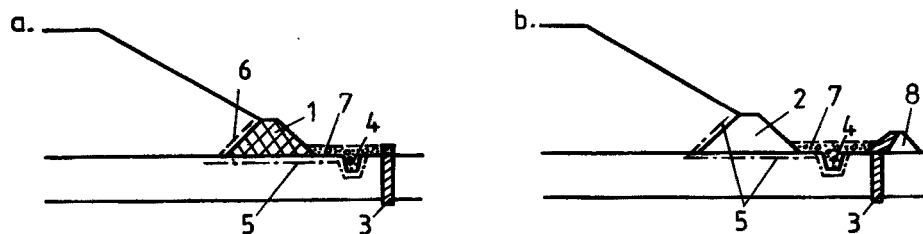
6.1. COUCHE PERMÉABLE D'ÉPAISSEUR LIMITÉE SOUS LE BARRAGE DE STÉRILES

Cette couche peut être favorable pour le drainage et la stabilité des barrages de stériles. Elle drainera la totalité de la fondation du barrage en augmentant sa stabilité, mais aussi en augmentant les débits de percolation. Si les eaux sont chimiquement polluées, ce qui est généralement le cas, il sera alors nécessaire de recouper et de collecter toutes ces fuites. Lorsque la couche perméable de fondation est recoupée pour arrêter les percolations, la pression interstitielle y augmentera et la stabilité sera diminuée. En vue d'obtenir la solution optimale, diverses variantes doivent être comparées. Le coût de l'extraction et du recyclage des eaux polluées, comparé aux avantages résultant de l'accroissement de la stabilité, devra être pris en compte dans le projet.

6.1.1. Barrages de stériles construits par la méthode amont

Si on choisit d'intercepter les fuites au droit du remblai d'amorce, il sera alors nécessaire de réaliser une coupure de la couche perméable sur toute sa hauteur. Cette coupure peut, par exemple, être constituée par une paroi moulée.

Dans la mesure où le remblai d'amorce est imperméable, ce qui est, dans ce cas, la situation la plus favorable, une couche filtre est nécessaire sur toute l'emprise du remblai d'amorce pour empêcher la migration de matériaux du barrage dans la fondation. Une couche drainante peut également être nécessaire sur le talus amont (Fig. 27 a).



6. DRAINAGE WITH PERMEABLE FOUNDATIONS

Two main cases of permeable foundations are considered :

6.1. PERMEABLE LAYER OF LIMITED THICKNESS UNDER THE TAILINGS DAM

Such a layer can be favourable for tailings dam drainage and stability. It will drain the entire tailings dam foundation improving its stability but also increasing the seepage discharge. If chemically polluted, which is usually the case, it will become necessary to intercept and collect all seepage. When the permeable foundation layer is intercepted to stop the seepage, the pore pressure in it will increase and cause reduction of stability. To achieve the optimum solution various alternatives must be compared. The cost of handling and recycling the polluted seepage compared with the cost benefit occurring from stability improvement will be taken into account in arriving at the design solution.

6.1.1. Tailings Dams of Upstream Construction

If a decision is taken to intercept the seepage at the starter dam then a cut-off must be constructed through the entire thickness of the permeable layer. The cut-off may consist of a slurry wall, for example.

In conjunction with an impermeable starter dam, which is the most favourable type for this situation, a filter layer over the base of the starter dam is necessary to prevent migration of the dam material into the foundation. A drainage layer may also be needed on the upstream slope (Fig. 27 a).

Fig. 27

Permeable layer in foundation
Couche perméable de fondation

- | | |
|-------------------------------|--|
| (1) Impermeable starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce imperméable</i> |
| (2) Permeable starter dam | (2) <i>Remblai d'amorce perméable</i> |
| (3) Slurry trench | (3) <i>Paroi moulée</i> |
| (4) Collector ditch | (4) <i>Fossé de colature</i> |
| (5) Filter | (5) <i>Filtre</i> |
| (6) Drains | (6) <i>Drains</i> |
| (7) Filter and drain material | (7) <i>Matériau pour drain et filtre</i> |
| (8) Reclaim dam if required | (8) <i>Barrage du bassin de récupération
(si nécessaire)</i> |

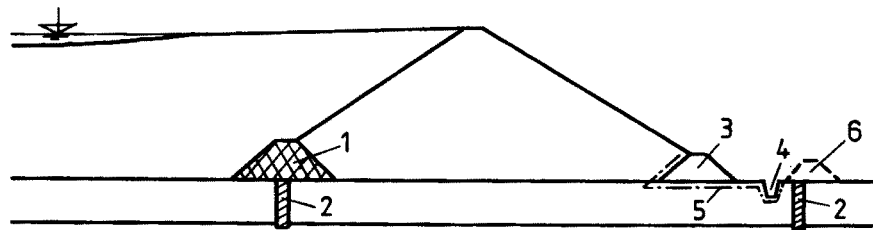
Pour un remblai d'amorce perméable, des filtres peuvent être nécessaires sur le talus amont et au contact de la fondation (Fig. 27 b).

Un petit batardeau implanté au-dessus de la coupure (Fig. 27b) peut être nécessaire, si les débits de percolation ne peuvent pas être totalement collectés par le fossé.

Dans tous les cas précités, les opérations de dépôt des stériles doivent être conduites de façon telle que les gradients d'écoulement diminuent aussi rapidement que possible après le démarrage des opérations. Ceci peut être obtenu en réalisant une large plage non submergée au niveau le plus bas possible.

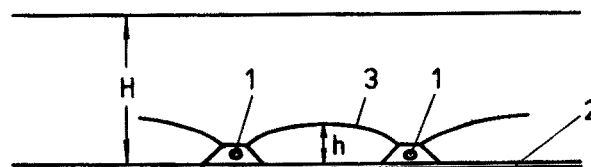
6.1.2. Barrages de stériles construits par la méthode aval

Les remblais d'amorce dans ce type d'ouvrage doivent être imperméables et conçus avec une coupure atteignant le substratum imperméable, en vue d'empêcher les percolations et le transfert de pressions interstitielles élevées de l'amont à la zone sous le barrage (Fig. 28). Les dispositions permettant d'intercepter et de collecter les fuites sont présentées sur la Fig. 27b. Là encore, un petit batardeau peut s'avérer nécessaire.



6.2. FONDATION PERMÉABLE SUR UNE FORTE ÉPAISSEUR

Lorsque la fondation est très perméable et que les effluents sont toxiques, il peut s'avérer nécessaire d'étancher toute la zone de stockage des stériles avec de l'argile ou une membrane synthétique. Deux géomembranes séparées par du sable, ou une couche d'argile recouverte d'une géomembrane, sont nécessaires lorsque la hauteur des stériles à stocker est très importante. Lorsque la charge est très élevée, des drains enrobés de filtres et mis en place au-dessus de la géomembrane abaissent de façon significative la ligne de saturation dans les stériles, et réduisent la pression d'eau sur la membrane (Fig. 29).



For a permeable starter dam filters may be required on its upstream face and the foundation contact (Fig. 27 b).

A small reclaim dam as shown in Fig. 27 b may be required over the cut-off if the seepage discharge cannot be totally contained in the collector ditch.

In all the above cases tailings deposition operations must be carried out in such a way that seepage gradients are decreased as early as possible after the commencement of operations. This can be achieved by establishing a wide non-submerged beach at the lowest possible level.

6.1.2. Tailings Dams of Downstream Construction

Starter dams for this type of dam must be impermeable and provided with cut-offs reaching the impermeable stratum to prevent seepage and the transfer of high pore pressure from upstream to under the dam (Fig. 28). The arrangement for intercepting and collecting seepage discharge is as shown in Fig. 27 b, placed at the eventual downstream toe of the tailings dam. Again a small reclaim dam may prove necessary.

Fig. 28

Permeable layer in foundation
Couche perméable de fondation

- | | |
|-----------------------------|--|
| (1) Impermeable starter dam | (1) <i>Remblai d'amorce imperméable</i> |
| (2) Slurry trench | (2) <i>Paroi moulée</i> |
| (3) Permeable toe dam | (3) <i>Pied de barrage perméable</i> |
| (4) Collector ditch | (4) <i>Fossé de colature</i> |
| (5) Filter | (5) <i>Filtre</i> |
| (6) Reclaim dam if required | (6) <i>Barrage du bassin de récupération</i>
<i>(si nécessaire)</i> |

6.2. PERMEABLE FOUNDATION TO SUBSTANTIAL DEPTH

Where the foundation is highly permeable and the tailing effluent is toxic, it may prove necessary to seal the entire tailings storage area with clay or polymer membrane. Two geomembranes are necessary, separated by sand, or a layer of clay covered by a geomembrane when the depth of tailings to be stored is very substantial. When the head is very high drains with filters laid over the geomembrane significantly lower the phreatic line in the body of tailings and reduce water pressure on the membrane (Fig. 29).

Fig. 29

Bottom drains over geomembrane
Drains au-dessus de la géomembrane

- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| (1) Drain | (1) <i>Drain</i> |
| (2) Geomembrane | (2) <i>Géomembrane</i> |
| (3) Phreatic line | (3) <i>Ligne de saturation</i> |

Si les effluents ne sont pas toxiques, il peut être suffisant d'augmenter la distance de percolation au moyen d'un tapis imperméable ou d'une membrane synthétique mis en place sur la fondation à l'amont du remblai d'amorce.

Si l'on considère que cette disposition n'est pas suffisante pour réduire les débits de percolation à un niveau acceptable, alors le chemin de percolation doit être augmenté par un mur-parafoille vertical et/ou un rideau d'injection. Les fuites sont collectées dans des puits de décharge à l'aval de la coupure.

If the effluent is non-toxic, it may be sufficient to extend the seepage path by an impervious blanket or by a polymer membrane over the foundation surface upstream from the starter dam.

If this is not assessed as being sufficient to reduce the seepage discharge to an acceptable amount then the seepage path may be designed to be further extended by a vertical cut-off wall and/or grout curtain. Seepage discharge is collected in borehole drains downstream of the cut-off.

7. MESURES CONFORTATIVES PENDANT L'EXPLOITATION

L'exploitation et la construction d'un barrage de stériles correspondent à une seule et même période qui dure beaucoup plus longtemps que la durée nécessaire à la construction d'un barrage de retenue conventionnel. La méthode de construction est également plus compliquée et de nombreuses inconnues peuvent se présenter. Des changements de méthode peuvent se révéler nécessaires du fait de conditions d'écoulement différentes de celles supposées au moment du projet.

Les mesures confortatives sont examinées ci-après en fonction du type d'anomalies rencontrées.

7.1. ANOMALIES DANS LA CONCEPTION DU DRAINAGE

7.1.1. Anomalies dans la granulométrie des stériles ou dans la conception et le dimensionnement des drains

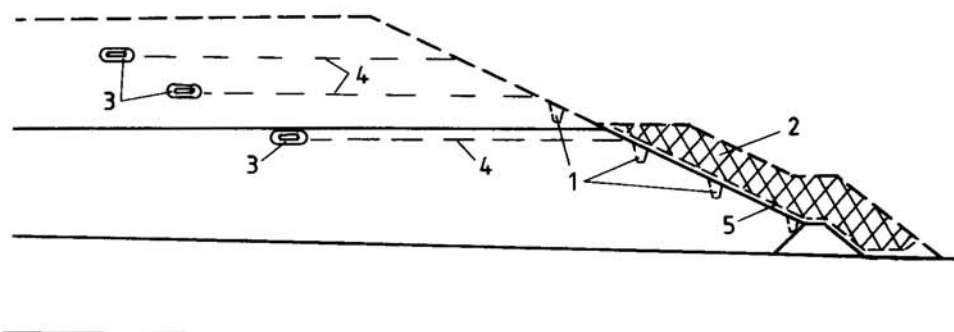
Des erreurs faites dans les spécifications des paramètres ci-dessus peuvent se traduire par une ligne de saturation plus haute que prévu au projet ou par des pressions interstitielles plus élevées.

Par exemple, des drains ou filtres mal conçus, associés avec un remblai d'amorce perméable, peuvent empêcher celui-ci de fonctionner correctement en drain et entraîner une résurgence de la ligne de saturation au-dessus de sa crête, sur le talus aval du barrage de stériles.

Dans ce cas, les phases de travaux suivantes sont recommandées :

Phase 1. Augmenter la largeur de la plage hors d'eau en abaissant le niveau de l'eau dans la retenue.

Phase 2. Creuser des tranchées drainantes dans le talus aval du barrage, tel que figuré sur la Fig. 30.



7. REMEDIAL MEASURES DURING OPERATION

The period of operation and construction of a tailings dam are one and the same and much longer than the time it takes to construct a conventional water retention dam of the same height. The construction procedure is also more complicated and there are many unknowns that can emerge. Changes in procedure can be made necessary by deviations in seepage conditions from those assumed at the time of design.

Remedial measures are discussed below in relation to the type of deficiency encountered.

7.1. DEFICIENCIES IN DRAINAGE PLANNING AND DESIGN

7.1.1. Deficiencies in Particle Size Distribution of Tailings or the Structure and Dimensions of Drains.

Mistakes made in the specification of the above parameters can result in the phreatic line being higher in the dam than predicted at the time of design or in pore pressures being excessive.

For example, improperly designed drains or filters associated with a pervious starter dam may prevent it from functioning correctly as a drain and the phreatic line may emerge above its crest on the downstream slope of the tailings dam.

If this occurs the recommended steps to be followed are :

Step 1 : extend the width of exposed beach by lowering the water level in the tailings storage.

Step 2 : dig drain trenches in the downstream tailings slope, as shown in Fig. 30.

Fig. 30

Remedial measures

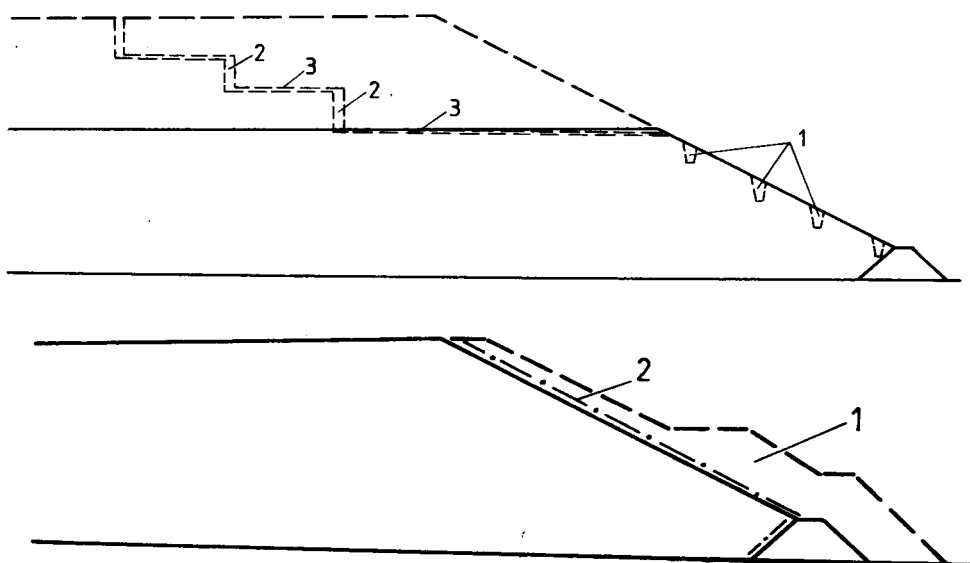
Mesures confortatives

- (1) Drain trench
- (2) Surcharge
- (3) Strip drainage
- (4) Drainage outlet
- (5) Drains

- (1) *Tranchée drainante*
- (2) *Surcharge*
- (3) *Bande drainante*
- (4) *Exutoire du drainage*
- (5) *Drains*

Phase 3. Placer une surcharge en matériau drainant sur le talus aval. Un filtre peut être nécessaire à l'interface avec le barrage. Le filtre peut être soit un matériau granulaire, soit un géotextile, si la conception est correcte.

Phase 4. Prévoir des drains en bande ou des drains verticaux avec des exutoires horizontaux dans le barrage de stériles (non encore construit) au-dessus du niveau maximal de la surcharge (Fig. 30 et 31). Une autre solution, qui peut se révéler plus économique si des quantités importantes de matériaux de rebut sont disponibles sur le site, est de surcharger l'ensemble du talus aval (Fig. 32).



Les barrages de stériles qui nécessitent ces travaux confortatifs sont, en général, constitués de matériaux fins dont le séchage est long. Pour cette raison, il peut être indispensable d'avoir un autre côté endigué ou une autre « lagune » pour recevoir les stériles, afin que la plage puisse suffisamment sécher et supporter ainsi les engins de construction. Des engins à larges chenilles et des tapis d'épandage seront utiles.

7.1.2. Anomalie dans la conception de l'évacuateur de crue

Un évacuateur de crue peut se révéler insuffisant si les crues ont été sous-estimées ou si l'évacuateur a été sous-dimensionné.

Ceci peut se traduire par une ligne de saturation à un niveau plus élevé et des intercalations de boues sur la plage résultant de sa submersion par la retenue. Dans ce cas, toutes les mesures décrites ci-dessus sont applicables, mais il reste préférable de recouper les couches de boue par des drains en marches d'escalier (Fig. 31).

Step 3 : place surcharge material (free draining) over the downstream slope. A filter may be required at the interface with the dam. Filter material may be granular or geotextile, if properly designed.

Step 4 : strip drains or vertical drains with horizontal outlets to be specified in the tailings dam (yet to be built) above the maximum surcharge level (Fig. 30 and 31). Alternatively, if a large quantity of waste material is available at the site it may prove more economical to surcharge the whole downstream face (Fig. 32).

Fig. 31

Remedial measures
Mesures confortatives

- | | |
|---|---|
| (1) Drain trench | (1) <i>Tranchée drainante</i> |
| (2) Vertical drainage | (2) <i>Drainage vertical</i> |
| (3) Horizontal drainage or drainage outlets | (3) <i>Drainage horizontal ou exutoires du drainage</i> |

Fig. 32

Remedial measures
Mesures confortatives

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| (1) Draining surcharge | (1) <i>Surcharge drainante</i> |
| (2) Filter | (2) <i>Filtre</i> |

Tailings dams that require this remedial work are usually of fine material that is slow to dry. For this reason it may be essential to have another dyked side or an additional lagoon to accept tailings while the beach dries out sufficiently to support the construction equipment required for drain construction. Wide track machines and spreader mats will help.

7.1.2. Deficiency in Spillway Design

A spillway may be deficient if floods are underestimated or if the spillway is designed for insufficient flood capacity.

This may lead to a higher level of the phreatic line and formation of slime intercalations across the beach due to its flooding by the pond. All the above specified measures may be applied in this case also but it will be best to intercept the slimes layers by staircase-like drains (Fig. 31).

7.1.3. Anomalie dans les méthodes de déversement

Un nombre insuffisant de points de déversement, un faible débit en un point de déversement, une densité de boue élevée sont des paramètres qui peuvent entraîner la formation de dépôts de boue et l'élévation de la ligne de saturation. Si ceci se produit, des mesures telles que celles montrées dans les Fig. 30 à 32 seront probablement nécessaires.

7.2. CHANGEMENT DANS LES DONNÉES DU PROJET

7.2.1. Changement dans les caractéristiques des stériles

Par suite de leur processus d'élaboration, les stériles peuvent se révéler plus fins, ce qui réduit leur perméabilité et leur résistance. Comme indiqué ci-dessus en 7.1, la ligne de saturation peut remonter et la consolidation être retardée. Des mesures confortatives telles que celles indiquées sur les Fig. 30 à 32 doivent être envisagées.

Dans la méthode de construction aval, une fraction sableuse réduite, résultant d'un produit plus fin, peut nécessiter un compactage et des couches drainantes à des niveaux plus élevés.

Les paramètres géotechniques des stériles retenus dans le projet peuvent ne pas être confirmés lorsque l'unité de traitement est mise en fonctionnement. Ceci peut s'appliquer à la granulométrie, à la quantité de stériles et à la densité des boues. Ces facteurs affecteront le transport hydraulique, le déversement et le cyclonage; des dispositions particulières devront être prises pour empêcher les dépôts de boue de colmater les drains et filtres.

7.2.2. Hauteur du barrage plus grande que prévu

Une augmentation de la capacité de stockage permettant de faire face à une quantité de stériles plus importante que prévu peut conduire à réaliser un barrage plus haut que prévu au projet.

Le projet devra être conçu de façon à permettre une extension facile des drains. Des drains en bandes (Fig. 30) ou en marches d'escalier (Fig. 31) doivent être mis en place dès qu'il est évident que le barrage sera plus élevé.

Si les drains ne permettent pas d'obtenir une sécurité suffisante, la mise en place d'une recharge (Fig. 20, 30 ou 32) doit être envisagée avec des matériaux appropriés.

Pour des barrages construits par la méthode aval, il peut être préférable de passer à la méthode amont plutôt que de continuer avec la même méthode qui nécessite un déplacement plus important du pied du barrage vers l'aval.

7.3. MAUVAIS FONCTIONNEMENT D'UN DRAINAGE BIEN CONÇU

Une mauvaise exécution des drains constitue la raison la plus fréquente pour que ces drains ne fonctionnent pas correctement. Les erreurs de construction

7.1.3. Deficiency in Spigotting Methods

An insufficient number of outlets, a small discharge from one outlet and high slurry density are factors which may result in the formation of slimes layers and raising the phreatic line. If this occurs then measures as shown in Fig. 30 to 32 will probably be required.

7.2. CHANGES IN DESIGN DATA

7.2.1. Change in Properties of Tailings

The tailings may be ground finer in the process of operation thus reducing permeability and strength. As in 7.1 above the phreatic line may be raised and consolidation retarded. Remedial measures as shown in Fig. 30 to 32 again should be carried out.

In downstream construction type tailings dams a reduced sand fraction resulting from a finer grind may necessitate both compaction and drainage layers at higher levels.

Property parameters of the tailings adopted in design may not be confirmed when the treatment plant is commissioned. This may apply to particle size distribution, the quantity of tailings discharge and slurry density. These factors will affect hydraulic transport, spigotting and cycloning and special measures must be undertaken to prevent slime deposition from clogging drains or filters.

7.2.2. Height of Dam Greater than Designed

Increased storage capacity to cope with more tailings from mining and processing of additional ore deposits may lead to raising the dam higher than the design level.

Provision should be made in the design for the easy extension of drains. Strip drains (Fig. 30) or staircase-type drains (Fig. 31) need to be introduced as soon as it is evident the dam will be higher.

If the required safety cannot be achieved by drains then surcharging as shown in Fig. 20, 30 or 32 using appropriate materials can be carried out.

For downstream type tailings dams it may be preferable to change to upstream construction rather than continue with the same method which requires the toe of the dam to be moved further downstream.

7.3. MALFUNCTION OF WELL DESIGNED DRAINAGE

Poor construction of drains is the most common reason for drains not functioning correctly. Construction faults could include grading not meeting

peuvent provenir d'une granulométrie ne répondant pas aux spécifications, de la ségrégation, d'un colmatage par des fines amenées par la circulation des engins ou le ruissellement, de dimensions inadéquates résultant de mauvaises méthode ou surveillance de construction, de désordres avant la mise en service. Les mesures confortatives résultant d'un drainage inadéquat sont semblables à celles recommandées ci-dessus.

7.4. DÉFICIENCES DU DÉVERSEMENT

Des méthodes inadaptées de déversement entraîneront un zonage défavorable et augmenteront artificiellement l'anisotropie et la formation de couches de boue. Les causes les plus fréquentes de tels désordres sont :

- le déversement continu au même endroit, provoquant des courants transversaux à la plage et le dépôt de couches de boues;
- le déversement avec un faible débit ou une mauvaise fermeture des points de déversement, provoquant un dépôt de boues sur la plage;
- la submersion de la plage par la retenue, provoquant un dépôt de boues;
- la formation de dépressions ou d'une plage à contre-pente pendant la construction des digues secondaires avec les stériles extraits de la plage.

L'incorporation, au stade de la conception, d'un système de drainage (Fig. 18) s'oppose à ces anomalies en constituant un système de drainage recoupant toutes les couches probables de boues.

specification, segregation, clogging by fine grained soils carried by traffic or rainfall runoff, inadequate dimensions due to poor construction practice or inspection and damage prior to commissioning. Remedial measures due to the resulting inadequate drainage will be similar to those recommended above.

7.4. SPIGOTTING DEFICIENCIES

Wrong spigotting methods will cause unfavourable material zoning, artificially increased anisotropy and formation of slime layers. The most frequent causes of such defects are :

- continuous spigotting at the same place causing streams transverse to the beach and deposition of slimes layers;
- spigotting with small discharge from the outlets or improper closing of outlets after spigotting is ceased causing slimes deposition on the beach;
- beach flooding by the lake causing deposition of slime layers;
- formation of pits or beach counter-slopes during construction of secondary dykes with tailings borrowed from the beach.

Incorporation at the design stage of drainage system, shown by Fig. 18, counter these deficiencies by providing a drainage system crossing all likely slimes layers.

8. FILTRES

La principale fonction des filtres est de retenir les particules du sol drainé tout en permettant à l'eau du sol de s'écouler dans la zone drainante constituée de matériaux grossiers. Les filtres sont situés :

- entre deux couches de sol adjacentes dont les granulométries sont assez différentes pour que les éléments de l'un des sols puissent migrer dans l'autre sol (Fig. 5 et 6);
- entre un sol à granulométrie fine, qui doit être drainé, et les matériaux relativement grossiers et perméables constituant les drains (Fig. 13 et 36);
- à l'interface entre un remblai à granulométrie fine et une fondation très perméable où l'écoulement peut éroder les particules fines du remblai (Fig. 27 a); ceci s'applique également au cas où la fondation perméable serait à granulométrie fine et le remblai à granulométrie grossière (Fig. 27 b et 28);
- sous et au-delà du pied aval du barrage (Fig. 27 et 28);
- sous les recharges drainantes (Fig. 32).

La conception d'un filtre doit tenir compte des propriétés du sol à drainer et à protéger de l'érosion, du débit prévisible et des techniques susceptibles d'être utilisées pour sa mise en oeuvre sans risque de rupture.

Une difficulté particulière dans la conception du filtre de protection des stériles est due au fait que la granulométrie des stériles est variable par suite de leur stratification qui est la conséquence des changements permanents des conditions d'écoulement pendant la sédimentation. De plus, les stériles sont non cohérents et de compacité faible, des facteurs qui les rendent particulièrement sensibles à l'érosion dans le cas où ils sont soumis à écoulement.

Les filtres peuvent être réalisés en matériau granulaire (naturel ou concassé) ou artificiel, tel que les géotextiles. Dans les deux cas, une conception rationnelle est indispensable. Ces filtres peuvent être nécessaires pour protéger des sols non cohérents ou cohérents.

Les critères et les prescriptions pour les différentes utilisations et les matériaux sont traités ci-après.

8.1. FILTRES EN MATÉRIAU GRANULAIRE PROTÉGEANT DES SOLS NON COHÉRENTS - CRITÈRES ET PRESCRIPTIONS

Le filtre doit retenir les éléments du sol à drainer et ses propres éléments ne doivent pas pénétrer dans la zone adjacente plus grossière. Si ces conditions ne

8. FILTERS

The primary function of filters is to retain the particles of a drained soil while allowing water flowing out of the soil to pass into a relatively free draining coarser zone. Accordingly filters are located :

- between every two neighbouring soil types that have such a difference in their grain size distribution, that particles from the one may migrate into the other (Fig. 5 and 6);
- between fine-graded soil to be drained and free-draining coarse materials forming the drains (Fig. 13 and 36);
- at the interface between a fine-graded fill and a very permeable base where the longitudinal seepage flow may erode particles of the fine-grained fill (Fig. 27 a); the same is valid for the cases when the permeable base is fine-grained and the fill is coarse- grained (Fig. 27 b and 28);
- under and beyond the downstream dam toe (Fig. 27 and 28);
- under drainage surcharge fill (Fig. 32).

The design of the filter must take account of the properties of the soil to be drained and protected from erosion, the discharge that may be expected to flow and the techniques available to construct the filter so that it can function without risk of failure.

A special difficulty in the design of filters for the protection of tailings is that the gradation of the tailings sediments vary due to the stratification which is the consequence of perpetual changes in the flow conditions during sedimentation. Further, the tailings sediments are non-cohesive and in loose condition, both facts making them prone to erosion in case of an attack of seeping water.

Filters may consist of granular (natural or crushed) or artificial materials such as geotextiles. In both cases a rational design is indispensable. They may be required to protect non-cohesive or cohesive soils.

The criteria and requirements for different applications and materials are dealt with below.

8.1. FILTERS OF GRANULAR MATERIALS PROTECTING NON-COHESIVE SOILS - CRITERIA AND REQUIREMENTS

As well as retaining the particles of the drained soil the filter's own particles must not penetrate into the adjacent coarser zone. If these condition cannot be met

peuvent pas être satisfaites par un seul matériau en une seule couche, le filtre doit être constitué de deux ou plusieurs couches permettant de remplir les conditions ci-dessus.

Les couches doivent être mises en place les unes après les autres, de la plus fine à la plus grossière, dans la direction de l'écoulement.

Lorsque les filtres protègent un sol non cohérent tel que les stériles, les critères empiriques suivants – entre autres – sont utilisés :

8.1.1. Critères d'entraînement (références 21, 9, 17, 20, 23, 24)

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & \frac{D_{15}^{\max}}{d_{85}^{\min}} < 5 \\ \text{(b)} \quad & \frac{D_{50}^{\max}}{d_{50}^{\min}} < 25 \\ \text{(c)} \quad & \frac{D_{15}^{\max}}{d_{15}^{\min}} < 20 \end{aligned}$$

où : d - diamètre des éléments du matériau à protéger.

D - diamètre des éléments du matériau protecteur (filtre).

Les indices « 15 », « 50 » et « 85 » indiquent le pourcentage en poids de matériau ayant un diamètre plus faible que celui de l'indice.

La notation « max » indique que le diamètre correspond à la courbe enveloppe du fuseau granulométrique du côté des éléments grossiers, et l'indice « min » à la courbe enveloppe du côté des éléments fins. En utilisant les valeurs « max » et « min » dans l'application de ces critères, on peut tenir compte de la variation de la granulométrie des stériles et de leur hétérogénéité.

Les critères précités présentent une certaine marge de sécurité (qui est difficilement quantifiable). Du fait de ces marges de sécurité précisément, on peut recommander d'appliquer ces critères lors du choix des matériaux de filtre destinés à protéger des stériles non cohérents.

Le premier critère (a), bien connu sous le nom de critère de filtre de Terzaghi, s'est avéré satisfaisant, même pour des conditions plus complexes que celles à partir desquelles il a été établi à l'origine (26).

Sherard et Dunnigan (19) ont ajouté une condition supplémentaire, à savoir que l'indice de plasticité des fines du filtre doit être égal à zéro.

D'après les études de Ziems (28) et Thanikachlam-Sakthivadivel (22), le second critère (b) s'applique à des sols à granulométrie continue, lorsqu'on utilise un filtre ayant un coefficient d'uniformité C_u de 6. Les valeurs limites empiriques sont 30 pour $C_u = 8$, 40 pour $C_u = 15$ et 50 pour $C_u = 18$ à 20 (28). D'après Karpoff (10), si les granulométries du sol et du filtre sont toutes les deux continues, la valeur limite empirique peut atteindre 58.

D'après l'USBR (10, 23), le troisième critère (c) peut atteindre une valeur de 40.

by one material in a single layer the filter should consist of two or more layers meeting the above requirements.

Layers must be laid consecutively with the size of particles and voids increasing from one layer to the next in the direction of the seepage flow.

When filters are protecting a non-cohesive soil such as tailings, the following empirical criteria – among others – for the soil-filter relationship are used :

8.1.1. Piping Criteria (references 21, 9, 17, 20, 23, 24)

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & \frac{D_{15}^{\max}}{d_{85}^{\min}} < 5 \\ \text{(b)} \quad & \frac{D_{50}^{\max}}{d_{50}^{\min}} < 25 \\ \text{(c)} \quad & \frac{D_{15}^{\max}}{d_{15}^{\min}} < 20 \end{aligned}$$

where : d is protected material (soil) particle diameter
D is protecting material (filter) particle diameter

The subscripts “ 15 ”, “ 50 ” and “ 85 ” indicate the percentage by weight of material with diameter smaller than that with the subscript.

The “ max ” index indicates that the diameter is applied to the envelope curve of the grain size distribution on the side of coarse particles and the “ min ” index on the side of fine particles. By using the max- and min- values in the application of these criteria, the variation of the gradation of the tailings sediments and their nonhomogeneity can be taken into account.

The criteria given above contain certain factors of safety (which can hardly be qualified). Just for these margins of safety they can be recommended to be observed in selecting filter materials to protect the non-cohesive tailings.

The first criterion (a), well known as the Terzaghi filter criterion, proved to be meaningful even under more complex conditions than those on which it has been originally based (26).

Sherard and Dunnigan (19) put the additional condition that the plasticity index of the fines of the filter should be equal to zero.

The second criterion (b), according to investigations of Ziems (28) and Thanikachlam-Sakthivadivel (22), applies to well graded soil using a filter with uniformity coefficient $C_u = 6$. The empirically established limit value in (28) is 30 at $C_u = 8$, 40 at $C_u = 15$ and 50 at $C_u = 18$ to 20. According to Karpoff (10), if the grain size distribution of the soil and the filter are both well graded the empiric limit value may be as high as 58.

The third criterion (c) may reach limit values up to 40 according to USBR (10, 23).

Si les critères précités sont appliqués à des matériaux cohérents, une marge supplémentaire de sécurité est incorporée, comme l'ont indiquée plusieurs chercheurs.

8.1.2. Critère de perméabilité

Par définition, les filtres sont toujours plus perméables que le sol qu'ils protègent puisqu'ils servent de transition entre les sols à drainer et les drains. Le critère suivant est utilisé pour essayer de définir l'accroissement de perméabilité nécessaire entre le sol et le filtre :

$$\frac{D_{15}^{\min}}{d_{15}^{\max}} > 4 \text{ à } 5$$

Terzaghi (21) a proposé que ce rapport ne soit pas inférieur à 4; ultérieurement, d'autres experts ont proposé qu'il ne soit pas inférieur à 5. Ceci signifie que la perméabilité du filtre doit être environ 25 fois supérieure à celle du matériau à drainer. Cette condition n'est pas obligatoire. Dans de nombreux cas, il peut être plus économique de ne pas l'observer, mais de réaliser la transition entre le sol et le drain au moyen de deux filtres consécutifs réalisés avec des matériaux localement disponibles. Le point essentiel est que le drain soit beaucoup plus perméable que le matériau à drainer, de façon à le drainer efficacement.

8.1.3. Critères de stabilité interne

La stabilité interne d'un matériau granulaire, désignée aussi sous le nom de « auto-stabilité » (« auto-filtre »), se réfère à la nécessité que les éléments du matériau ne doivent pas migrer à l'intérieur du matériau lui-même. Les sols qui ne sont pas stables de façon interne ne peuvent pas être utilisés comme filtre car ils perdent leurs éléments fins sous l'action de l'écoulement et des vibrations.

Il est souhaitable qu'un matériau de filtre soit autostable ou du moins pratiquement autostable (un sol pratiquement autostable est un sol dans lequel le pourcentage d'éléments fins qui peut être lessivé sans remanier le squelette est inférieur à 5 %).

Le caractère « autostable » d'un sol à granulométrie continue peut être vérifié en coupant arbitrairement en deux sa granulométrie et en comparant les fractions fine et grossière sur la base du premier critère (a) (Fig. 33).

$$(a) \quad \frac{D_{15} \text{ fraction grossière}}{D_{85} \text{ fraction fine}} < 5$$

Un filtre peut être testé en utilisant plusieurs points de coupure tout au long de sa courbe granulométrique. Si les trois conditions suivantes sont vérifiées (un critère de stabilité interne plus contraignant d'après Tan, Weimar et al. (9)), le sol peut être considéré comme stable de façon interne :

$$(b) \quad \frac{D_{55}}{D_{50}}, \frac{D_{50}}{D_{35}} \text{ et } \frac{D_{35}}{D_{15}} \text{ sont tous } < 5$$

If the above criteria are applied to cohesive materials, further margin of safety is incorporated, as has been observed by many researchers.

8.1.2. Permeability Criterion

By definition filters are always more permeable than the base soils to be protected because they serve as a transition between drained soils and drains. The following criterion is used in an attempt to define the increase in permeability required between soil and filter :

$$\frac{D_{15}^{\min}}{d_{15}^{\max}} > 4 \text{ to } 5$$

Terzaghi (21) has proposed that this ratio should not be smaller than 4 and later other experts have proposed it not smaller than 5. This means that the filter permeability must be some 25 times higher than that of the drained material. This requirement is not binding. In many cases it may prove more economical not to observe it but to accomplish the transition between the base soil and the drain by two consecutive layers of available local materials. The essential point is that the drain must be much more permeable than the drained material in order to drain it efficiently.

8.1.3. Internal Stability Criteria

The internal stability, known also as autostability, of a granular material refers to the requirement that the particles of the material must not migrate within the same material. Internally unstable soils cannot function as filters because they lose their fine particles due to seepage and vibration.

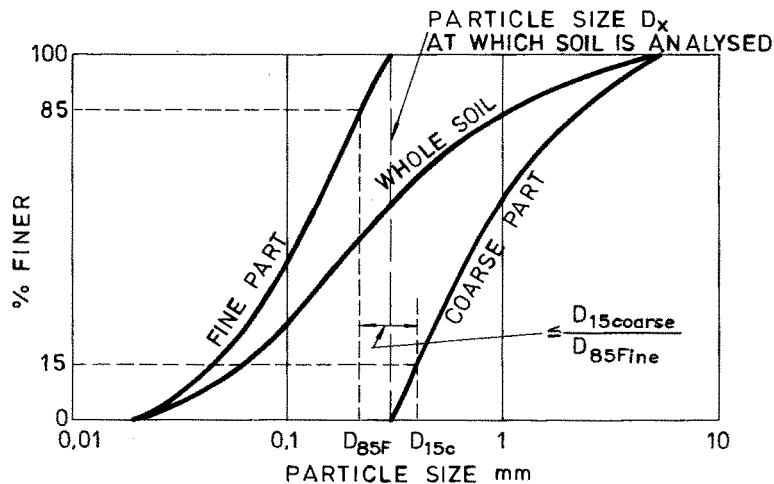
It is advisable that filter materials be autostable or at least practically autostable – (practically autostable is a soil in which up to 5 % of the particles may be washed out without disturbing its skeleton).

The autostability of a well graded soil can be verified through splitting the gradation curve in two arbitrary sections and then comparing the coarse and fine fractions using the first piping criterion (a) (Fig. 33).

$$(a) \quad \frac{D_{15} \text{ coarse fraction}}{D_{85} \text{ fine fraction}} < 5$$

A filter may be tested using many splitting points throughout the soil grading curve. If verified for the following three conditions (a more stringent criteria of autostability according to Tan, Weimar et al (9)) the soil can be taken to be internally stable :

$$(b) \quad \frac{D_{55}}{D_{50}}, \frac{D_{30}}{D_{35}} \text{ and } \frac{D_{35}}{D_{15}} \text{ are all } < 5$$



Sherard et Dunnigan (19) ont proposé des règles générales pour évaluer la stabilité interne sur la base du coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10}$:

- | | | |
|-----|--------------------|---|
| (c) | Si $C_u < 10$ | le sol est en général autostable; |
| | Si $10 < C_u < 20$ | le sol est autostable si sa courbe granulométrique ne présente pas de variation brutale de pente; |
| | Si $20 < C_u < 75$ | le sol est autostable si sa courbe granulométrique est régulière sans variation rapide de pente ni palier de trop grande extension. |

En général, plus la granulométrie est étendue et le coefficient d'uniformité élevé, plus le sol a de chance d'être instable de façon interne. La plupart des mélanges sable-gravier (et même de sable avec un pourcentage significatif de silt) ne sont pas stables de façon interne. Pour cette raison, l'US Bureau of Reclamation (23) et l'US Corps of Engineers (24) ont proposé le critère suivant pour les filtres :

- (d) $D_5 > 0,074 \text{ mm}$

Dans certains cas, ceci peut conduire à laver le sable naturel et les mélanges sable-gravier.

Si le sol à protéger n'est pas stable de façon interne par suite d'une teneur en silt élevée, les critères de filtre doivent être vérifiés en supposant le silt enlevé.

Si le sol à protéger comprend deux constituants avec une absence marquée de certains éléments, les critères de filtre doivent être vérifiés pour le constituant le plus fin.

Les stériles miniers sont généralement autostables.

Fig. 33

Analysing the internal stability of soils by splitting the gradation
Analyse de la stabilité interne des sols par coupure de la granulométrie

Sherard and Dunnigan (19) have proposed general guidelines for evaluation of the internal stability on the basis of the uniformity coefficient $C_u = D_{60}/D_{10}$:

- | | | |
|-----|--------------------|---|
| (c) | If $C_u < 10$ | the soil is as a rule autostable; |
| | If $10 < C_u < 20$ | the soil is autostable if the grading curve has no abrupt changes in direction; |
| | If $20 < C_u < 75$ | the soil is autostable if its grading curve is smooth with no abrupt changes in direction or considerable flat lengths. |

In general, the wider the grading and the higher the uniformity coefficient the more likely it will be that the soil is internally unstable. Almost every sand-gravel mixture (and even sand with a significant silt content) is usually internally unstable. For this reason the US Bureau of Reclamation (23) and the US Corps of Engineers (24) have recommended the following criterion for filters:

- (d) $D_5 > 0.074 \text{ mm}$

In some cases this may require washing of natural sand and sand-gravel mixtures.

If the protected base soil is internally unstable due to high silt content, the piping criteria should be verified with the silt removed.

If the protected soil is a two-component one with a clearly expressed gap, the piping criteria towards an adjacent filter should be verified for the soil finer than the gap (for the fine component alone).

Milled mining tailings are usually autostable.

8.1.4. Prescriptions relatives à la protection vis-à-vis de la ségrégation

La ségrégation des matériaux de filtre au cours du transport, de la mise en place et de l'épandage modifie leur composition granulométrique dans des zones isolées et au contact avec le sol à protéger. Cela modifie les conditions d'entraînement dans la zone de contact et l'autostabilité (auto-filtre) du filtre.

La ségrégation peut être empêchée ou réduite à des limites acceptables en utilisant des matériaux de filtre de coefficient d'uniformité plus faible. Cela correspond aux prescriptions relatives à la stabilité interne, mais dépend des matériaux naturels disponibles localement. Il peut s'avérer nécessaire d'adopter un matériau de coefficient d'uniformité plus élevé. On peut réduire la ségrégation en transportant et épandant le matériau à une teneur en eau de 5 % et en veillant à ne pas le déverser d'une trop grande hauteur. Si malgré cela il y a ségrégation, le changement de la courbe granulométrique du filtre doit être envisagé.

Il est souhaitable de retenir pour le filtre $C_u < 20$ de façon à se prémunir de la ségrégation (10), mais on peut aussi retenir $C_u < 50$ sous réserve que des mesures soient prises pour réduire la ségrégation et que le filtre soit à granulométrie continue.

8.1.5. Prescriptions relatives à la protection vis-à-vis du colmatage

Une certaine migration des éléments fins du sol à protéger vers les interstices du filtre est inévitable. Il faut établir un équilibre entre le squelette du filtre et les éléments de sol à retenir en vue d'assurer une transition stable entre le sol et le filtre. Le colmatage survient lorsque les éléments entraînés du sol et/ou des zones adjacentes au filtre obstruent les interstices du filtre et le rendent moins perméable que le matériau à protéger.

Il est peu probable que les filtres conçus en respectant les critères d'entraînement soient sujets à colmatage.

Les filtres susceptibles d'être colmatés sont ceux présentant (9) :

- une granulométrie uniforme, avec $C_u < 5$;
- une granulométrie discontinue;
- une ségrégation, entraînant une granulométrie discontinue.

Des critères de colmatage sont proposés par Pravednii (18).

8.1.6. Critères hydrauliques

Ziems (28) et Brauns (6) ont étudié la stabilité au contact sol-filtre en fonction des gradients hydrauliques dans le sol à protéger et le filtre. Cependant, les résultats présentés par chaque auteur sont sujets à révision et ne peuvent être actuellement utilisés dans les projets.

Des critères hydrauliques sont également proposés dans le document réf. (18).

8.1.7. Épaisseur des filtres

En vue de garantir l'efficacité des filtres granulaires, ceux-ci doivent avoir une certaine épaisseur qui, en fait, dépend des gros éléments du matériau en question.

8.1.4. Segregation Protection Requirements

Segregation of filter materials during transportation, placing and spreading changes its grain size distribution in isolated zones and in contact with the protected soil. This changes the piping conditions at the contact and the autostability of the filter itself.

Segregation can be prevented or reduced to safe limits by using filter material of lower uniformity coefficient. This coincides with the requirements of internal stability but it depends on the locally available natural material. It may be necessary to use material of higher uniformity coefficient. Segregation may be reduced by transporting and spreading the material at a moisture content of 5 % and being careful not to drop it from any significant height. If, despite all, segregation does occur changing the grain size curve of the filter should be considered.

It is advisable for the filter to have $C_u < 20$ in order to prevent segregation (10), but $C_u < 50$ can also be adopted on condition that measures are taken to reduce segregation and the filter is not gap-graded.

8.1.5. Protection Requirements against Clogging

Some migration of fine fractions from the base soil towards the pores of the filter is inevitable. It is even necessary in order to establish equilibrium between the filter skeleton and the retained base particles in order to provide for a stable transition between the base and the filter. Clogging occurs when migrating particles of the base and/or of adjacent section of filter block its pores and reduce permeability to less than that of the base material.

Filters designed with adherence to piping criteria are unlikely to clog.

More susceptible to clogging are filters (9) :

- uniformly graded with $C_u < 5$;
- gap graded;
- segregated, causing gap grading.

Clogging criteria are proposed by Pravednii (18).

8.1.6. Hydraulic Criteria

Ziems (28) and Brauns (6) have examined base-filter interface stability in relation to hydraulic gradients in the base and filter. However each author's findings are tentative and cannot be used in design at this stage.

Hydraulic criteria are also proposed in (18).

8.1.7. Thickness of Filters

In order to guarantee the efficiency of granular filters, they must have a certain thickness, which in fact depends on the coarseness of the material in question. In a

Une étude récente (27 et également 6 et 9) donne une épaisseur minimale de projet pour le filtre :

$$t_{\min} > 330 D_5$$

En pratique, l'épaisseur du filtre dépend également des méthodes d'épandage et des machines utilisées. Dans le cas d'une mise en place manuelle de filtres autour de drains en forme de tuyau ou de bande, de faibles dimensions, l'épaisseur minimale des couches horizontales sera de 150-200 mm, et celle des couches verticales et inclinées de 300 mm. Lorsqu'on utilise une machine pour épandre des filtres horizontaux, l'épaisseur minimale sera de 200-300 mm. L'épaisseur minimale des couches verticales et inclinées sera de 1,5 m si elles sont compactées avec d'autres couches, et de 3 m si elles sont compactées seules.

L'épaisseur du filtre doit aussi tenir compte des déplacements résultant du tassement et de la consolidation sous le poids propre et les charges sismiques. Du fait des méthodes de construction utilisées, les déplacements dans les barrages de stériles seront toujours beaucoup plus importants que dans les barrages en terre classiques. Lorsque les déformations du barrage influent sur les caractéristiques de projet, il importe de calculer, ou d'estimer, les déplacements dans chaque cas.

8.1.8. Densité et compactage

Les critères empiriques sont basés sur l'hypothèse que les filtres sont compactés à la même densité que celle requise dans la construction des zones en sable et gravier des barrages en remblai. Les matériaux granulaires non compactés (lâches) sont beaucoup plus sujets à entraînement et à érosion interne que les matériaux compactés. Les filtres non compactés sont aussi sujets à colmatage. Les stériles déversés et les couches de filtre de matériaux de stériles grossiers cyclonnés, non compactés, présentent une faible densité initiale. Ils subiront un certain compactage provoqué par la charge des remblais sus-jacents au cours de la construction du barrage de stériles, mais auront toujours une densité plus faible que dans le cas d'un compactage par rouleau vibrant. Aussi, les critères de filtre indiqués ci-dessus seront-ils appliqués avec beaucoup de soin. L'USBR propose un compactage avec une densité relative minimale de 70 % (23).

8.1.9. Stabilité mécanique, chimique et biologique

Les éléments des matériaux de filtres et de drains doivent avoir une résistance suffisante pour que leur granulométrie ne soit pas beaucoup modifiée au cours de leur manipulation et de leur mise en place. Le matériau doit être durable et résister aux produits chimiques utilisés dans les opérations.

Diverses causes de dégradation géo-chimique des matériaux granulaires peuvent se présenter : l'altération, la solubilité, l'oxydation, l'hydratation, l'hydrolyse, la dispersion et l'échange de cations.

Les matériaux de stériles, filtres et drains, susceptibles de subir une altération géo-chimique proviennent de divers types de roche : matériaux calcaires au contact d'eau acide (eau acide percolant des stériles dans les filtres et drains); matériaux contenant des pyrites ou oxydes de fer; argilites avec une forte proportion de matériaux gonflant ou un fort pourcentage de sodium échangeable; roches ignées et

recent research (27, see also 6 and 9) a design rule for the minimum thickness for a filter is given :

$$t_{\min} > 330 D_5$$

The practical filter thickness depends also on the methods of spreading and the machines used. In manual spreading of filters around small strip or pipe drains the minimum thickness of the horizontal layers should be 150-200 mm and that of inclined and vertical layers, 300 mm. In machine spreading of horizontal filters the minimum thickness should be 200-300 mm. The minimum thickness of inclined and vertical layers, if compacted together with other layers is 1.5 m, and if compacted alone – 3 m.

The filter thickness must also allow for expected displacements caused by settlement and consolidation under own weight and earthquake loading. Because of the methods of construction that are used the displacements in tailings dams will always be much greater than in conventional earthfill dams. Where deformation of the dam will impact on design features it is important that displacements are estimated quantitatively in each case.

8.1.8. Density and Compaction

The empirical criteria are based on the assumption that filters are compacted to the same density as that required for construction of sand and gravel zones in embankments. Uncompacted (loose) granular materials are much more susceptible to piping and internal erosion than compacted ones. Uncompacted filters are also liable to clogging. Spigotted tailings and filter layers of coarse-grained cycloned uncompacted tailings possess low initial density. They will receive some compaction by the fill load applied to them with the extension of the tailings dam, but will always possess lower density than if compacted by vibrating rollers. Thus, the filter criteria given above should be applied with due care. A minimum 70 % relative density compaction is suggested by the USBR (23).

8.1.9. Mechanical, Chemical and Biological Stability

The particles of filter and drain materials must possess sufficient strength in order that their grading is not significantly altered during handling and placing. The material must be durable and resistant to chemicals used in the dressing process.

There may exist many causes for the geochemical degradation of granular materials : weathering, solubility, oxidation, hydration, hydrolysis, dispersion and cation exchange.

Susceptible to geochemical degradation are tailings, filter and drain materials originating from various rock types : calcareous materials in contact with acidic water (acidic water leaches from the tailings into the filters and drains); materials containing pyrite or iron oxides; mudstones with high proportions of expandable materials or high percentages of exchangeable sodium; weathered igneous and

métamorphiques altérées. Même un faible pourcentage de matériau chimiquement actif peut avoir un effet important sur les caractéristiques géotechniques du remblai, telles que : densité, résistance, compressibilité, granulométrie et perméabilité; ce sont précisément les propriétés principales pour un filtre ou un drain.

Même si les filtres ou drains sont chimiquement résistant, ils peuvent être colmatés par des pyrites ou oxydes de fer provenant du lessivage des stériles.

Une autre cause de colmatage des filtres ou drains est d'ordre biologique, résultant de la présence de bactéries intervenant dans l'extraction industrielle de minerais.

Le colmatage chimique et biologique n'est pas bien connu, mais on doit en tenir compte dans la conception des filtres et drains des barrages de stériles, en portant attention à la composition exacte des stériles et des matériaux granulaires utilisés dans les filtres et drains.

Il y a des minerais contenus dans des roches altérées et présentant un pourcentage important d'argile. La partie colloïdale de cette argile peut former une solution avec l'eau de percolation à travers les stériles. Les particules colloïdales peuvent alors pénétrer dans les filtres et s'y déposer, même si les critères d'entraînement sont remplis. Dans de tels cas, des études très approfondies doivent être effectuées lors du projet, car il y a danger que les filtres puissent se colmater. Si une telle situation ne peut être évitée, on doit alors choisir un type de barrage de stériles dont la stabilité ne dépend pas des filtres et drains (par exemple, un barrage de type à retenue d'eau).

8.1.10. Critère de non-cohésion des filtres

Les filtres ne doivent pas être cohérents. Dans le cas contraire, des fissures peuvent survenir dans le remblai et se propager à travers le filtre, par suite de tassements différentiels, de retrait dû à la dessiccation, de séismes. Si un filtre est constitué de matériaux sans cohésion, il obturera la fissure par éboulement des matériaux lorsque l'eau remplit la fissure. La non-cohésion des matériaux du filtre est facile à vérifier. Un échantillon compacté de matériau de filtre est préparé dans une cuve, démoulé comme un pudding sur un plateau, puis immergé avec soin. Si le matériau s'affaisse jusqu'à son angle de talus naturel lorsque le niveau d'eau monte, le matériau peut être considéré comme dépourvu de cohésion et accepté comme matériau de filtre.

8.2. FILTRES EN MATÉRIAU GRANULAIRE PROTÉGEANT DES SOLS COHÉRENTS - CRITÈRES ET PRESCRIPTIONS

Les critères relatifs aux filtres protégeant des sols non cohérents sont très conservatifs s'ils s'appliquent aux filtres protégeant des sols cohérents. Les critères d'entraînement (8.1.1 (a)-(c)) peuvent augmenter avec l'augmentation de la proportion de fines ou avec l'augmentation de l'indice de plasticité I_p (8, 9, 10, 24, 25, 27). Dans ce cas, aucune règle géométrique n'est valable. Elles ne peuvent être obser-

metamorphic rock. Even a low percentage of chemically active material can have a major effect on the geotechnical characteristics of the fill such as density, strength, compressibility, grading and permeability, which are exactly the properties of importance for a filter or a drain.

Even if the filters or drains are chemically resistant they may become clogged by pyrite or iron oxides leached from the tailings.

Another cause for clogging of filters and drains is a biological one due to presence of bacteria participating in the industrial extraction of ore.

Chemical and biological clogging is not well understood but should be considered in the design of filters and drains in tailings dams bearing in mind the exact composition of tailings and granular materials used in filters and drains.

There are ores which are part of weathered rocks, containing a significant percentage of clay. The colloid part of this clay can make a solution with the water seeping through the tailings. Then the colloidal particles penetrate the filters and can settle there, even though the piping criteria are fulfilled. In such cases this must be studied very carefully experimentally during design, because there is a danger that the filters may become blocked. If this situation cannot be avoided, then a tailings dam of a type that is not dependant on any filters or drains for its stability, must be chosen (eg. a tailings dam of the same type as a water retaining dam).

8.1.10. Criterion of Filter Non-Cohesiveness

Filters must be non-cohesive. Otherwise cracks may develop in the embankment and propagate across the filter due to differential settlement, shrinkage by drying or earthquake loading. If a filter consists of non-cohesive material it will close the crack by collapsing when water fills the crack. The non-cohesiveness of filter materials is easily tested. A compacted sample of filter material is prepared in a basin, turned out like a pudding on to a tray, and then carefully flooded. If the material slumps to its angle of repose with the rise of the water level the material can be considered as non-cohesive and accepted for filter material.

8.2. FILTERS OF GRANULAR MATERIALS PROTECTING COHESIVE SOILS - CRITERIA AND REQUIREMENTS

The criteria for filters protecting non-cohesive soils are very conservative if applied to filters protecting cohesive soils. The piping criteria (8.1.1 (a)-(c)) may increase with increase in the proportion of fine particles or with increase in the plasticity index, I_p (8, 9, 10, 24, 25, 27). In this case no geometric rules are valid. They cannot be observed because cohesion retains the clay particles. Clay is

vées car la cohésion retient les éléments d'argile. L'argile est autostable. Ses particules ne migrent pas, mais sont ramollies et lessivées dans la zone de contact avec le filtre.

Le premier critère d'entraînement de l'argile silteuse, d'indice de plasticité I_p de 6 à 15, et de l'argile d'indice $I_p > 15$ peut s'écrire :

$$\begin{array}{ll} \text{pour } 6 < I_p < 15 & \frac{D_{15}}{d_{85}} < 10 \text{ à } 15 \\ \text{pour } I_p > 15 & \frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 25 \end{array}$$

Pour les deuxième et troisième critères d'entraînement $\left(\frac{D_{50}}{d_{50}} \text{ et } \frac{D_{15}}{d_{15}}\right)$, on peut avoir une valeur nettement supérieure à 25.

Selon le « Soil Conservation Service » (9), tout sable ou mélange de sable-gravier peut être utilisé comme filtre pour l'argile d'indice $I_p > 15$.

Pour prévenir le ramollissement de l'argile au contact avec le filtre et la séparation de particules, la condition suivante doit être satisfaite (24) :

$$D_{15} < 0,4 \text{ mm}$$

Sur ce problème, des critères sont également proposés par Pravednii (18).

Une catégorie particulière de sols sont les sols apparemment cohérents, qui peuvent être classés comme dispersifs. Une disparition totale de la cohésion est possible si leur structure est altérée. Les critères de cohésion ne peuvent leur être appliqués. Un grand nombre de variétés de stériles à granulométrie fine appartiennent à cette catégorie. De ce fait, chaque type de stériles doit faire l'objet d'un examen préalable.

8.3. FILTRES EN MATÉRIAU SYNTHÉTIQUE - CRITÈRES ET PRESCRIPTIONS

Les produits synthétiques, tels que les « géotextiles », apparaissent aujourd'hui comme des solutions intéressantes en remplacement des filtres granulaires. Comparativement à ces derniers, ils possèdent un certain nombre de particularités :

- ils se présentent sous forme de feuille, de faible épaisseur;
- ils sont extensibles dans une certaine mesure, et conviennent donc aux barrages de stériles présentant des déformations importantes; ils sont capables de supporter des forces de traction, suivant le type et le matériau;
- s'agissant de produits synthétiques industriels, leurs propriétés ou qualités sont homogènes;
- ils s'adaptent aux talus raides;
- ils sont économiques et présentent un certain nombre d'avantages écologiques.

autostable. Its particles do not migrate but are softened and washed out at the filter interface.

The first piping criterion of silty clay with plasticity index I_p from 6 to 15 and of clay with $I_p > 15$ may be :

$$\begin{aligned} \text{for } 6 < I_p < 15 \quad & \frac{D_{15}}{d_{85}} < 10 \text{ to } 15 \\ \text{for } I_p > 15 \quad & \frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 25 \end{aligned}$$

The relations of the second and third piping criteria $\left(\frac{D_{50}}{d_{50}} \text{ and } \frac{D_{15}}{d_{15}}\right)$ may be much greater than 25.

According to the Soil Conservation Service (9), each sand and sand-gravel mixture can be used as filter for clay with $I_p > 15$.

To prevent softening of clay at the interface with the filter and detachment of particles the following condition should be observed (24) :

$$D_{15} < 0.4 \text{ mm}$$

Criteria on this problem are proposed also by Pravednii (18).

A special category of soils are the so called apparently cohesive soils that can be classified as dispersive. A complete breakdown of cohesion is possible if their structure is disturbed. The criteria concerning cohesion cannot be applied to them. Many varieties of fine-grained tailings or fine-grained tailings deposited in ponds belong to this category. Each type of tailings must be examined in advance for these features.

8.3. SYNTHETIC FILTER FABRICS - CRITERIA AND REQUIREMENTS

Synthetic products like "geotextiles" are nowadays regarded as useful alternative to granular filters. As compared to granular filters they have a number of peculiarities :

- they are sheet-type materials, small in thickness;
- they are stretchable to some extent, which makes them suitable for tailings dams with considerable deformation, or are able to take tensile forces, depending on type and material;
- they are homogeneous and consistent in properties or quality, as they are synthetic industrial products;
- they are convenient for operation particularly in steep slopes;
- they are economical and have a number of ecological advantages.

Par contre, une conception rationnelle quant aux propriétés de filtration est encore sujette à discussion. La stabilité mécanique, chimique et biologique à long terme des géotextiles, de même que leur sensibilité à la lumière et au gel, nécessitent une attention spéciale. L'expérience disponible à ce jour couvre quelques décennies d'application. Pour ces raisons, les filtres synthétiques situés dans des zones où ils ne peuvent être remplacés, doivent être utilisés avec précaution, en particulier s'ils jouent un rôle important vis-à-vis de la sécurité du barrage.

Les propriétés de filtration des géotextiles dépendent beaucoup de leur type.

Les géotextiles tissés présentent une structure très régulière (ils sont assimilables à un tamis). Ils sont produits avec différentes porosités. Ceux ayant une faible porosité possèdent des qualités plus uniformes, mais leur utilisation n'est pas très adaptée aux barrages de stériles.

Il y a deux types principaux de géotextiles non-tissés :

1. les géotextiles aiguilletés, de 2 à 6 mm d'épaisseur, qui sont extensibles et dont l'épaisseur et les dimensions des pores changent lorsqu'ils sont comprimés (structure tridimensionnelle irrégulière des interstices).

2. les géotextiles à liaisons thermiques rigides, constitués de longs filaments adhérents les uns aux autres, dont l'épaisseur et les dimensions des pores ne diminuent pas sous pression (ils sont assimilables à un tamis avec des dimensions d'ouvertures irrégulières). Ils peuvent supporter des forces de traction.

Le géotextile aiguilleté déformable du premier type est aussi fabriqué avec un traitement thermique sur une face. Dans ce cas, il est recommandé d'appliquer cette face contre celle d'où vient l'eau. La face durcie par traitement thermique retiendra les particules du sol. Cependant, les particules entrant dans le géotextile peuvent en sortir. De ce fait, il ne sera pas facilement colmaté.

Pour chaque géotextile, le fabricant fournira la courbe de distribution des dimensions des pores O_d , qui sera utilisée pour l'application des critères d'entraînement. La capacité de filtration d'un géotextile est généralement définie par une dimension d'ouverture caractéristique, par exemple O_{90} . C'est une valeur d'indice, entrant dans un critère de filtre de la forme :

$$O_{90} < 0,6 d_{50}^{\min}$$

ou similaire. « O » est la dimension de pore du géotextile, l'indice « 90 » le pourcentage de pores de dimension inférieure à celle de l'indice, « d » le diamètre de l'élément de sol à protéger.

L'indice « min » indique que le diamètre s'applique à la courbe enveloppe granulométrique du côté des particules fines.

L'application des critères d'entraînement au premier type de géotextile est approximative du fait du changement de la dimension des pores sous l'effet de la charge.

En ce qui concerne la capacité de filtration, le deuxième type de géotextile doit être préféré, car il résiste mieux au colmatage et est plus léger. Toutefois, en raison de sa rigidité, il ne convient pas aux zones des barrages de stériles où de grandes déformations sont prévues.

On the other hand, a rational design as to the filtration properties is still subject to discussion. The mechanical, chemical and biological long-time stability of geotextiles, as well as their susceptibility to sunlight and frost damages require special consideration. Experience available so far covers few decades of application. For these reasons, synthetic filters in zones, where they cannot be replaced, should be used with caution, particularly if their function will be critical to dam safety.

The filtration properties of the geotextiles depend largely on their type.

Woven geotextiles are very flat and regular in structure (they may be similar to a sieve). They are produced with different porosity. Those of low porosity have more consistent qualities, but they are not very convenient for use in tailings dams.

There are two main types of non-woven geotextiles :

1. needle punched geotextiles with thickness of 2 to 6 mm, which are stretchable and changes their thickness and sizes of pores when compressed (three dimensional irregular pore structure), and
2. rigid heat-bonded geotextiles with longer filaments adhered one to the other, which do not decrease their thickness and pore size under pressure (similar to a sieve with irregular opening sizes). They can take tensile forces.

Needle punched deformable geotextile of the first type is also manufactured with a heat-treated side. In this case it is advisable to apply its heat-treated side to that from which water comes. The thermal treatment hardened side will retain the soil particles. However particles entering the geotextile can leave it. Thus it will not be easily clogged.

Each geotextile should be supplied by the manufacturer with its pore-size grading curve O_i which is used for application of the piping criteria. The filtration capacity of geotextiles is usually defined by a typical opening size, e.g. O_{90} . This is an index value, used in a filter rule of the form

$$O_{90} < 0.6 d_{50}^{\min}$$

or similar. Here “O” is the geotextile pore size and the index “90” is the percentage of pores with size smaller than that of the index, and “d” is the protected soil grain diameter.

The “min” index indicates that the diameter is applied to the envelope curve of the grain size distribution on the side of fine particles.

The application of the piping criteria to the first type of geotextile is approximate because of the change in the pore size under loading.

In relation to filtering capacity, the second type geotextiles are to be preferred since they resist clogging more efficiently and are lighter. However, due to their stiffness, they are not suitable for application in locations of the tailings dams where considerable deformation is to be expected.

Il y a diverses méthodes d'essais pour déterminer la dimension de l'ouverture caractéristique et celle-ci est définie de plusieurs manières. De ce fait, on peut difficilement donner un critère de filtre objectif.

Les critères de filtre pour les géotextiles sont très approximatifs et servent seulement de guide pour le choix du géotextile avant l'exécution d'essais. Avant l'utilisation d'un géotextile comme filtre, il faut le soumettre à des essais en association avec le sol réel. Cela est réalisé au moyen d'un perméamètre, à charge constante, où la quantité d'eau s'infiltrant à travers le sol et le filtre est mesurée. Si, après un certain temps, le débit se stabilise et l'infiltration continue, on peut considérer que le géotextile a subi l'épreuve avec succès. Une diminution continue du débit sans stabilisation traduit un colmatage probable; une augmentation du débit sans stabilisation signifie qu'un entraînement de matériaux est possible.

Lorsque les stériles sont déversés directement sur un géotextile ou que les boues s'écoulent directement sur celui-ci, des particules de stériles pénètrent dans le géotextile et provoquent son colmatage partiel. Ce processus sera accéléré par la charge des couches ultérieures de stériles déposées sur le géotextile. Aussi, le déversement direct ou l'écoulement direct de boues sur un géotextile doivent-ils être absolument évités afin de ne pas le colmater. Avant un déversement, une couche de stériles sera épandue sur le géotextile et il est recommandé d'utiliser à cet effet des stériles grossiers ou du sable.

Une méthode de protection vis-à-vis du colmatage d'un géotextile non tissé, étalé horizontalement, consiste à le recouvrir d'un géotextile tissé, de perméabilité élevée, avant déversement des stériles (4). Bien que ce géotextile tissé ne suffise pas comme filtre, il ne peut être colmaté et, pour cette raison, il peut protéger le matériau non tissé lors du déversement.

There are different testing procedures to determine the typical opening size and the typical opening size is defined in various ways. Thus an objective filter criterion can hardly be given.

The filter criteria for geotextiles are very approximate and serve only for guidance in the selection of geotextile prior to making tests with them. Before a geotextile is used as a filter it must be tested for effectiveness with the actual soil. This is performed by a constant head permeameter test where the quantity infiltrating through the soil and the filter is recorded. If, after a time, the discharge becomes steady and infiltration continues, the geotextile is considered to have passed the test. Discharge decreasing continuously without stabilising will mean that clogging is likely and discharge increasing without stabilising will mean that piping is possible.

When spigotting is carried out directly or the slurry is directly flowing over a geotextile, tailings particles will penetrate into it and cause its partial clogging. This process will be accelerated with the load of further tailings layers deposited over the geotextile. Therefore spigotting or direct slurry flow over a geotextile should be avoided absolutely in order not to clog it. Prior to spigotting, a tailings layer should be spread on the geotextile and it is recommended that coarse tailings or sand are used for this purpose.

A method to protect a horizontal spread nonwoven geotextile from clogging is to cover it with a woven geotextile of higher permeability before spigotting (4). Although this woven geotextile is not sufficient to act as a filter it cannot be clogged and for this reason is acceptable for protection of the spunbond material when spigotting is to be carried out.

9. DRAINS

9.1. FONCTIONS DES DRAINS

La fonction principale des drains est la maîtrise des percolations d'eau dans le corps du barrage. Il y aura abaissement de la ligne de saturation, diminution de la pression d'écoulement et de la pression interstitielle, et accélération de la consolidation. Pour obtenir une efficacité maximale, un drain et son exutoire doivent permettre l'écoulement régulier par opposition à une mise en bouillie.

Au cours de la construction d'un barrage de stériles, les conditions de drainage changeront de manière significative et, pour cette raison, plusieurs étapes seront étudiées, en tenant compte de l'emplacement de la retenue et de la hauteur du barrage, afin de garantir que les drains et leurs exutoires seront toujours efficaces.

9.2. EMPLACEMENT DES DRAINS

L'emplacement des drains, pour chaque type de barrages de stériles, est examiné dans le chapitre 5. Pour chaque drain, on peut étudier diverses solutions en vue de sélectionner son emplacement optimal. Afin d'être pleinement efficace, un drain doit être situé de façon à réduire substantiellement la charge maximale et à drainer une zone définie du barrage de stériles.

9.3. LARGEUR DES DRAINS

La largeur du tapis drainant à exécuter au niveau de la fondation ou à des niveaux intermédiaires doit être suffisante pour rabattre la ligne de saturation jusqu'au niveau du drain et pour assurer des conditions d'écoulement en canal au débit maximal. Les modèles basés sur l'analogie électrique sont probablement la méthode la plus simple pour déterminer la largeur d'un drain, tenant compte de la géométrie irrégulière, de l'hétérogénéité, de l'anisotropie et des conditions aux limites. La largeur d'un drain ne peut, cependant, être déterminée avec exactitude par des méthodes numériques, bien que ce soient des moyens puissants dans d'autres cas.

9. DRAINS

9.1. FUNCTIONS OF DRAINS

The main function of drains is to provide a controlled discharge of water from within the body of the dam. This will lower the phreatic line, decrease the hydrodynamic and pore pressure and accelerate consolidation. A drain and its outlet should provide channel flow conditions as distinct from piping flow, to obtain maximum efficiency.

During the construction of the tailings dam, drainage conditions will change significantly and for this reason several stages should be investigated taking account of pond location and dam height to ensure that drains and their outlets are always effective.

9.2. LOCATION OF DRAINS

The location of drains for each type of tailings dam is discussed in section 5. Alternatives can be considered for each drain in order to select its optimum location. To be fully effective a drain should be located so that it substantially reduces the maximum head and dewater a defined zone of the tailings dam embankment.

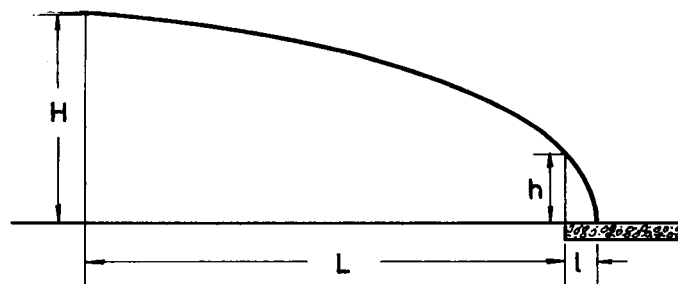
9.3. WIDTH OF DRAINS

The width of the blanket drains to be constructed at foundation level or at intermediate levels should be sufficient to lower the phreatic line to the level of the drain and for channel flow conditions to exist at maximum discharge. Models based on electrical analogy are probably the simplest method of determining the width dimension taking into account irregular geometry, nonhomogeneity, anisotropy and boundary conditions. The drain width cannot be found yet exactly by numerical methods, although they are powerful in all other cases.

On peut calculer approximativement la largeur du tapis drainant nécessaire au moyen de la formule relative à la percolation dans un milieu homogène en direction d'un drain horizontal, comme indiqué sur la Fig. 34 (13) :

$$l = \frac{1}{2} (\sqrt{L^2 + H^2} - L)$$

- où l est la largeur du drain nécessaire,
 L est la distance horizontale entre la retenue et le drain,
 H est la différence de hauteur entre la retenue et le drain.



Les largeurs de drains obtenues à partir de cette formule sont très importantes. Les valeurs calculées pour l/H en fonction de L/H et l/L sont données dans le Tableau ci-dessous :

L/H	1	2	3	4	5	6
l/H	0,20	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04
l/L	0,20	0,06	0,027	0,015	0,01	0,007

On peut définir ces largeurs avec plus de précision après une étude détaillée des percolations à travers le barrage de stériles, en tenant compte de l'hétérogénéité, de l'anisotropie et des conditions réelles aux limites. Elles peuvent être alors beaucoup plus petites.

9.4. ÉPAISSEUR DES DRAINS

L'épaisseur, la largeur et le gradient du drain doivent être tels que, pour la perméabilité donnée du drain, l'écoulement reste laminaire sous la charge maximale.

L'épaisseur et la perméabilité des drains doivent être suffisantes pour assurer l'évacuation du débit sous faible pression en évitant tout écoulement turbulent.

The required blanket drains width can be calculated approximately by the formula for seepage in homogeneous media towards a horizontal drainage as shown on Fig. 34 (13) :

$$l = \frac{1}{2} (\sqrt{L^2 + H^2} - L)$$

where l is the required drain width,
 L is the horizontal distance from the pond to the drain,
 H is the pond and drain height difference.

Fig. 34

Model for the formula for the width of horizontal drainage
Schéma définissant la largeur du drain horizontal

The drain widths obtained by this formula are considerable. The values calculated for l/H in relation to L/H and l/L are given in the following Table :

L/H	1	2	3	4	5	6
l/H	0.20	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04
l/L	0.20	0.06	0.027	0.015	0.01	0.007

These widths can be defined more accurately only after a detailed study of seepage in the tailings dam considering non-homogeneity, anisotropy and the actual boundary conditions. Then they can be much smaller.

9.4. THICKNESS OF DRAINS

Thickness, width and gradient of the drain must be such that for the drain permeability, channel flow conditions prevail at maximum discharge.

The thickness and the permeability of the drains must be enough to conduct all seepage discharge without pressure but to preclude turbulent flow condition.

L'épaisseur minimale proposée pour les drains horizontaux est :

- exécution manuelle : 150 mm,
- exécution à la machine : 250 mm.

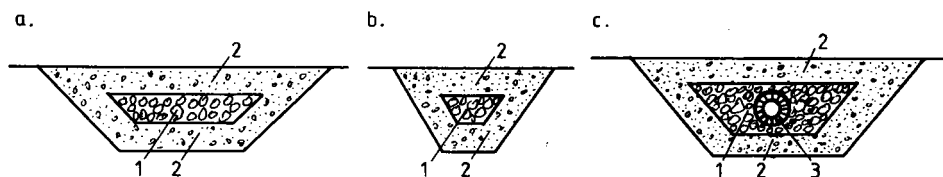
Par exemple, si le matériau grossier déversé doit avoir une fonction de drain, comme indiqué dans la Fig. 24, la couche devra avoir une épaisseur de 100 à 150 mm et une perméabilité au moins 100 fois plus élevée que celle des stériles fins à drainer.

On doit tenir compte des déformations supplémentaires pouvant résulter des tremblements de terre dans les zones sismiques.

9.5. MATÉRIAUX POUR DRAINS

Le matériau utilisé dans un drain doit avoir normalement une perméabilité 200 à 1 000 fois plus élevée que celle du sol drainé. Le gravier, de granulométrie fine à grossière, est un matériau idéal et le gravier fin conviendra à la plupart des barrages de stériles. Si elle est appropriée, la roche exploitée peut être également utilisée.

Le drain doit, bien entendu, être entouré d'un matériau filtrant, comme indique la Fig. 35. Une plus grande capacité de drainage peut être obtenue, si nécessaire, en installant des tuyaux perforés ou à fente comme le montre la Fig. 35 (c).



Le matériau granulaire entourant un tuyau avec fentes ou perforé doit satisfaire aux critères suivants :

$$\frac{D_{85} \text{ (filtre)}}{\text{largeur de la fente}} > 1,2$$

$$\frac{D_{85} \text{ (filter)}}{\text{diamètre du trou}} > 1,0$$

Lorsque des tuyaux avec fentes sont utilisés comme drains, ils doivent être perforés sur la moitié supérieure seulement. La moitié inférieure doit être pleine pour permettre à l'eau de percolation de s'écouler dans la zone où la ligne de saturation est prévue plus basse que les tuyaux.

Des tuyaux devront être utilisés si les drains sont fondés sur un sol dur, le tuyau devant être capable de supporter la charge sus-jacente. De tels tuyaux ne

The minimum thickness proposed for horizontal drains is :

- 150 mm for construction by hand;
- 250 mm for construction by machine.

As an example, if coarse spigot material is to act as a drain as shown in Fig. 24 the layer should be 100 to 150 mm thick and have a permeability at least 100 times higher than the finer tailings to be drained.

Consideration must be given to extra deformation that may be caused by earthquake shocks in seismic area.

9.5. MATERIALS TO BE USED IN DRAINS

Material used in drains should normally be 200 to 1000 times more permeable than the drained soil. Fine to coarse sized gravel is an ideal material and in most applications in tailings dams fine gravel will be suitable. Mine rock, if appropriate, can also be used.

The drain must of course be surrounded by filter material as shown in Fig. 35. A larger drainage capacity can be provided if required by installing perforated or slotted pipes as illustrated in Fig. 35 (c).

Fig. 35

Floating drains

Drains flottants

- (1) Gravel
- (2) 1:1 sand - gravel mixture
- (3) Perforated pipe

- (1) *Gravier*
- (2) *Mélange sable-gravier 1/1*
- (3) *Tuyau perforé*

Granular material surrounding slotted or perforated pipe should meet the following criteria :

$$\frac{D_{85}(\text{filter})}{\text{slot width}} > 1.2$$

$$\frac{D_{85}(\text{filter})}{\text{hole diameter}} > 1.0$$

When slotted pipes are used as drains they must be perforated in the upper half only. The bottom half must be solid to allow the seeped water to flow along in the area where the phreatic surface is expected to be lower than the pipes.

Pipes should be used only if drains are founded on sound ground and the pipe is able to support the load on it. In drains placed in the tailings dam body at

sont pas recommandés dans les drains situés à des niveaux intermédiaires dans le corps de barrages de stériles, car des tassements importants et irréguliers peuvent conduire à des déplacements aux joints entraînant une érosion interne ou un colmatage. Pour cette raison, des drains flexibles (par exemple, tuyaux avec raccordements élastiques par manchons de caoutchouc) seront utilisés dans le corps des barrages de stériles.

Une autre solution ayant fait ses preuves consiste à adopter des tuyaux comportant des entailles ou des trous plus larges et de les envelopper d'un géotextile de perméabilité élevée pour les protéger du colmatage.

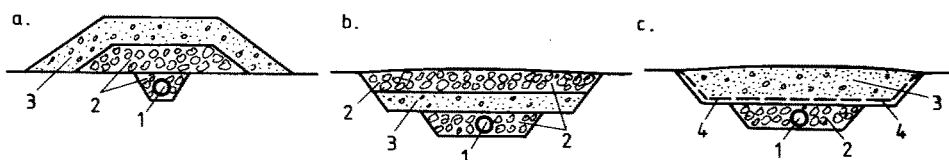
Lorsque des tuyaux de grand diamètre seront utilisés, ils seront posés suivant des tracés rectilignes et aboutiront à des trous d'homme, afin qu'ils puissent être visités et nettoyés, en particulier s'il y a risque de dépôts chimiques causant des colmatages.

Dans les fondations de barrages de stériles construits par la méthode aval, des bandes drainantes ont été construites dans certains cas (Fig. 36 a). Cependant, de tels drains ne sont pas protégés et avant d'être recouverts par les stériles déposés ils peuvent être détériorés par les ruissellements d'eau de pluie et d'eau industrielle. Il est préférable de les enterrer dans le sol (Fig. 36 b et 36 c). Pour assurer une meilleure protection, on peut les recouvrir d'une couche supplémentaire de gravier (Fig. 36 b) ou d'un mélange sable-gravier (Fig. 36 c). On peut également utiliser un géotextile au lieu d'un filtre en sable (Fig. 36 c).

Un tapis drainant sur la fondation d'un barrage de stériles construit par la méthode aval (Fig. 23) peut être constitué d'une seule couche de sable ou de sable-gravier, recouvrant un réseau de drains en gravier équipés, si possible, de tuyaux d'évacuation (Fig. 36). Un tapis drainant bi-couche serait plus efficace, la couche supérieure étant constituée de sable ou de sable-gravier et la couche inférieure de gravier recouvrant un réseau de caniveaux de drainage, comme illustré par la Fig. 37 (b).

Les drains flottants (Fig. 17) peuvent être construits plus vite et plus facilement en utilisant un géotextile au lieu d'un filtre en sable. Afin d'empêcher le colmatage du géotextile par les boues déversées, on doit le recouvrir de stériles grossiers (Fig. 38 a).

L'efficacité du drainage sera beaucoup plus grande lorsque les sables et graviers du filtre seront bien compactés.



intermediate heights, pipes are not recommended because of large and irregular settlement, which can lead to displacement at joints causing internal erosion or clogging. For this reason flexible drains, including pipes with elastic connections of rubber muffs, should be used in the tailings dam body.

Another proved design solution is to use slotted pipes with larger holes or slots and to wrap them with geotextile of high permeability to protect them from clogging.

When pipes of large diameter are used, they should be laid in straight lengths, leading to manholes so that they can be inspected and cleaned, especially if there is a danger of chemical deposits causing blockages.

Strip drains in the foundations of tailings dams of downstream construction have been constructed in some cases as shown on Fig. 36 a. Such drains however are not protected and before they are covered by the deposited tailings, they can be damaged by rain and industrial water flowing down. It is better to bury them in the ground as shown on Fig. 36 b and 36 c. To protect them better, they could be covered by a supplementary layer of gravel (Fig. 36 b) or sand-gravel mixture (Fig. 36 c). Geotextile may also be used instead of a sand filter (Fig. 36 c).

Blanket drains on the foundation of a tailings dam of downstream construction, as shown on Fig. 23, can be made of a single layer of sand or sand-gravel overlying a net of drain canals filled with gravel and, if possible, also with discharging pipes (Fig. 36). A two-layer blanket drain would be more efficient, the upper layer consisting of sand or sand-gravel and the lower one of gravel overlying a net of drain ditches as shown in Fig. 37 b.

The floating drains (Fig. 17) can be constructed faster and easier using geotextile instead of the sand filter. To prevent the geotextile from clogging by the spigotted slurry, it must be covered with coarse tailings (Fig. 38 a).

The efficiency of the drainage will be much greater when the sand and gravel material of the filter is well compacted.

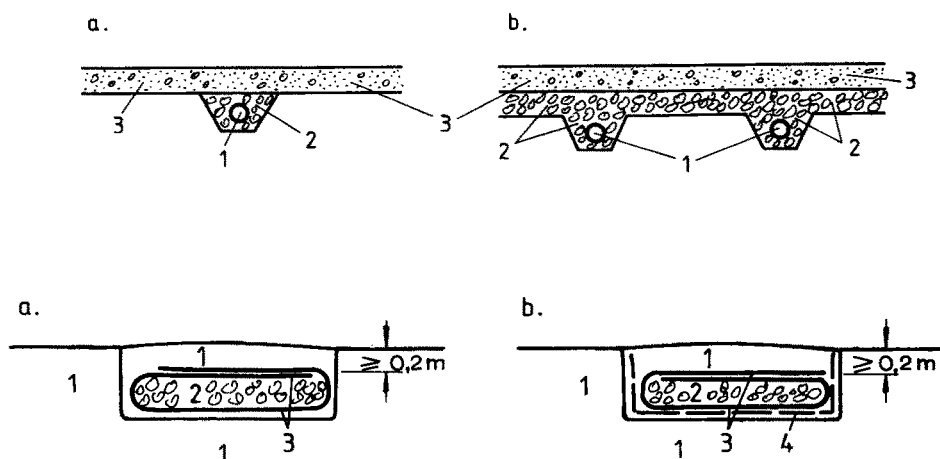
Fig. 36

Strip or finger drains on the ground
Bretelle drainante sur le sol

- | | |
|-------------------------------------|---|
| (1) Perforated pipe | (1) <i>Tuyau perforé</i> |
| (2) Gravel | (2) <i>Gravier</i> |
| (3) Sand or 1:1 sand-gravel mixture | (3) <i>Sable ou mélange sable-gravier 1/1</i> |
| (4) Geotextile | (4) <i>Géotextile</i> |

9.6. OUVRAGES D'ÉVACUATION DES DRAINS

Les ouvrages d'évacuation sont conçus pour conduire l'eau s'écoulant dans les drains en dehors du barrage de stériles. Si l'ouvrage d'évacuation est situé sur une couche imperméable, il peut être constitué des mêmes matériaux que le drain lui-même. Il peut être équipé d'un tuyau, comme indiqué dans les Fig. 36 et 37. S'il s'agit d'un drain flottant dans le barrage de stériles (Fig. 17), ou si le drain est situé sur une fondation perméable, l'organe d'évacuation doit être revêtu d'une géomembrane pour éviter que l'eau ne sorte (Fig. 38 b).



Lorsque l'ouvrage d'évacuation sort des stériles et passe à travers ou sous le remblai d'amorce, un tuyau plein peut être utilisé. Dans certains cas, on peut installer une vanne à la sortie du tuyau pour contrôler le débit au cours de la mise en place initiale des stériles (Fig. 10).

9.7. DISPOSITIFS FILTRE-DRAIN

Un filtre est toujours associé à un drain, les deux formant un ensemble indissociable. Plusieurs de ces dispositifs sont présentés ici.

Un drain sur le talus d'un barrage en argile (Fig. 9 et 10) peut être constitué de matériaux naturels puisque la pente est relativement douce – environ 1/2,5 (Fig. 39). Tout d'abord, un filtre est mis en place sur le talus d'argile, puis un drain recouvert d'un autre filtre. Si le matériau de ce filtre n'est pas assez résistant pour permettre le passage des ouvriers manipulant les tuyaux de déversement, ou s'il ne peut résister à l'impact de boues s'échappant accidentellement, il doit être protégé. Cela peut être réalisé au moyen de blocs ou de dalles en béton. On peut utiliser un géotextile à la place du filtre fin sur le talus d'argile (Fig. 39 b), ou deux géotextiles, l'un au-dessous, l'autre au-dessus du drain en gravier (Fig. 39 c). Le drain complet

9.6. DRAIN OUTLETS

Outlets are designed to convey water flowing in the drains clear of the tailings dam. If the outlet is running on impermeable stratum then it can be made of the same material as the drain itself. It may also be provided with a buried pipe as shown in Fig. 36 and 37. If the drain is floating in the tailings (Fig. 17) or there is a permeable foundation under it, the discharge outlet must be lined with a geomembrane to prevent water from escaping, as shown in Fig. 38 (b).

Fig. 37

Blanket drain

Tapis drainant

- (1) Perforated pipe
- (2) Gravel
- (3) 1:1 sand-gravel mixture

- (1) *Tuyau perforé*
- (2) *Gravier*
- (3) *Mélange sable-gravier 1/1*

Fig. 38

Floating strip drains or drain outlets

Bretelle drainante flottante

- (1) Tailings
- (2) Gravel
- (3) Geotextile
- (4) Geomembrane

- (1) *Stériles*
- (2) *Gravier*
- (3) *Géotextile*
- (4) *Géomembrane*

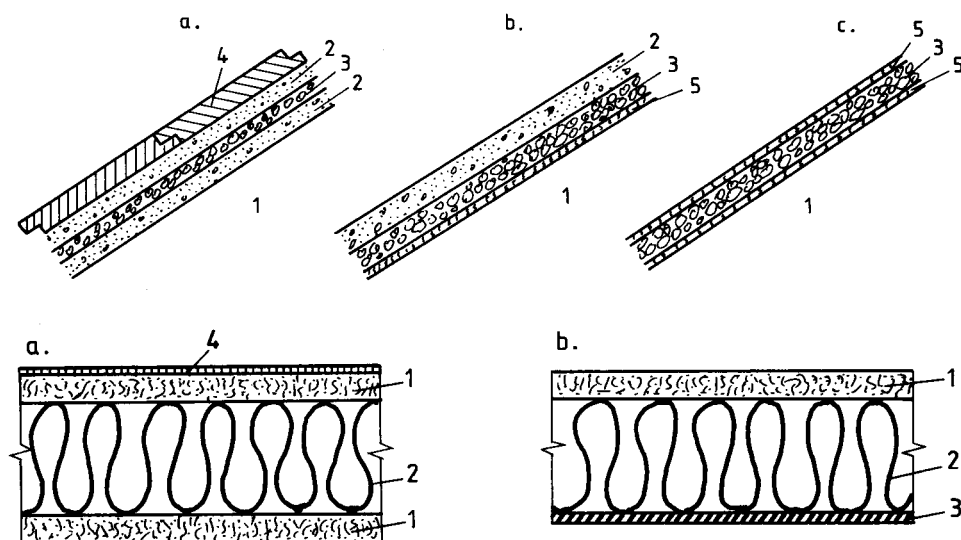
When the outlet passes out of the tailings and through or under the starter dam, a solid pipe may be used. In some cases a valve may be installed at the outlet of the pipe to control the flow during the initial placement of tailings (Fig. 10).

9.7. FILTER AND DRAIN SYSTEMS

A drain is always assisted by a filter to form a common system. Several of them are submitted herein.

A drain over the slope of a clay dam (Fig. 9 and 10) can be constructed of natural material since the slope is more gentle - about 1:2.5 (Fig. 39). At first a filter is laid on the clay slope, then a drain followed by a filter on top. If the material of this filter is not sufficiently resistant to allow people walking to handle spigotting hoses or if it cannot resist impact of accidentally escaping slurry, then it must be protected. This can be effected by concrete blocks or slabs. A geotextile can also be used to replace the fine filter over the clay slope (Fig. 39 b), or both under and over the gravel drain (Fig. 39 c). The entire drain can be made of a combined prefabricated highly permeable drain with a geomembrane underneath

peut être constitué d'un drain préfabriqué, de perméabilité élevée, comportant une géomembrane à la partie inférieure et un géotextile à la partie supérieure (Fig. 40) pouvant être recouvert par un géotextile tissé supplémentaire.



Les drains flottants représentés sur la Fig. 17 peuvent être identiques à ceux illustrés par la Fig. 35. Afin d'éviter que les matériaux des drains ne soient entraînés par les boues, il importe d'enterrer ces drains dans les stériles de la plage. L'épaisseur de chaque couche de sable filtrant ne doit pas être inférieure à 150 mm. Les drains peuvent également être constitués comme indiqué sur les Fig. 36 b ou 36 c.

Les filtres de sable entourant les drains peuvent être remplacés par un géotextile, comme indiqué sur la Fig. 38. Il faut veiller à ce que le drain de gravier muni de son enveloppe ne remplisse pas la tranchée, une profondeur de 200 mm devant être laissée pour être remplie par des stériles.

Les parties verticales des drains en marches d'escalier, représentés sur la Fig. 18, sont constituées d'un mélange sable-gravier; mais si un géotextile est utilisé, seul du gravier est nécessaire. Le raccordement horizontal entre les drains verticaux peut être réalisé au moyen des organes d'évacuation linéaires des drains, situés à des intervalles déterminés. Ces organes d'évacuation sont enterrés dans la plage et constitués comme indiqué sur les Fig. 38 a et 38 b. De cette façon, ils seront protégés contre les dégâts et le colmatage au cours du déversement des stériles. On peut également utiliser des drains préfabriqués, tels ceux représentés sur les Fig. 40 a et 40 b; ils doivent également être enterrés dans la plage et recouverts d'une couche de stériles fins pour ne pas les mettre en contact avec les écoulements de boues.

Des drains préfabriqués, associés à des filtres en géotextile, sont une fourniture courante. Ils sont appelés « géocomposites ». Ils sont constitués d'un matériau artificiel poreux très perméable, non déformable, de perméabilité longitudinale élevée

and geotextile on top (Fig. 40), which may be covered by additional woven geotextile.

Fig. 39

Filters on slope

Filtres sur talus

- | | |
|-----------------------------------|---|
| (1) Earthfill | (1) <i>Remblai en terre</i> |
| (2) Sand or sand - gravel mixture | (2) <i>Sable ou mélange sable-gravier</i> |
| (3) Gravel | (3) <i>Gravier</i> |
| (4) Concrete slab - perforated | (4) <i>Dalle en béton perforée</i> |
| (5) Nonwoven geotextile | (5) <i>Géotextile non tissé</i> |

Fig. 40

Prefabricated drains

Drains préfabriqués

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| (1) Nonwoven geotextile | (1) <i>Géotextile non tissé</i> |
| (2) Profiled plastic | (2) <i>Plastique</i> |
| (3) Geomembrane | (3) <i>Géomembrane</i> |
| (4) Woven geotextile | (4) <i>Géotextile tissé</i> |

The floating drains shown in Fig. 17 can be made similar to those illustrated in Fig. 35. In order not to be washed away by slurry they need to be buried in the tailings of the beach. The thickness of each filter sand layer should not be less than 150 mm. They can be made also as shown on Fig. 36 b or 36 c.

Geotextile can be used as a substitute for sand filters around drains as shown in Fig. 38. Care must be taken not to fill the trench with the encapsulated gravel drain but to leave 200 mm depth to be backfilled with tailings.

The vertical sections of the staircase-shaped drains, shown in Fig. 18, are made of sand-gravel mixture, but if geotextile is to be used gravel only is needed. The horizontal connection between the vertical drains can be provided by linear drain outlets spaced at specified intervals. These outlets can be buried in the beach and constructed as shown on Fig. 38 a and 38 b. Thus they will be secured against damage and clogging during spigotting. Prefabricated drains can also be used as shown on Fig. 40 a and 40 b. They must also be buried in the beach and covered by a thin tailings layer so as not to be in contact with slurry streams.

Currently prefabricated combined drains with geotextile filters are being produced. They are called geocomposites. They consist of non-deformable highly permeable porous artificial material of high longitudinal permeability (very coarse

(tissu très grossier ou feuilles plastiques profilées, etc), enveloppé dans un géotextile non tissé (Fig. 40 a). Leur utilisation dans le cas de drains en « marches d'escalier » (Fig. 18) est tout à fait indiquée.

Il existe également des drains constitués d'un matériau non déformable, très perméable, recouvert, sur la partie supérieure, d'un filtre en géotextile et, sur la partie inférieure, d'une géomembrane imperméable (Fig. 40 b). Ils peuvent ainsi évacuer les eaux de percolation à l'extérieur, empêchant leur infiltration dans les couches sous-jacentes. Ils peuvent être adoptés comme filtres à des niveaux intermédiaires dans les barrages de stériles.

Les drains seront construits en prenant soin de ne pas permettre le mélange ou la ségrégation des matériaux du drain et du filtre. On veillera, en particulier, lors du premier recouvrement des drains par les stériles, à empêcher les boues de pénétrer dans les filtres pour éviter leur colmatage.

Les drains et filtres doivent être recouverts de stériles dès leur exécution, afin de les protéger contre l'eau de pluie, la pollution par l'eau et les poussières, la pénétration des boues et la végétation. Des précautions seront prises pour éviter leur détérioration par les engins de construction et les animaux.

Dans des conditions climatiques sévères, les drains seront situés dans le corps des barrages de stériles à une profondeur suffisante pour les soustraire au gel. L'ouvrage d'évacuation doit être placé dans le sol à l'aval du barrage à une profondeur telle que les fortes gelées ne puissent l'endommager.

Les percolations et les fuites des barrages de stériles, de même que le comportement des drains et des filtres, doivent être surveillés de très près pour que des mesures puissent être prises, en cas d'anomalies. La surveillance doit être exercée pendant toute la période opérationnelle et longtemps après la fin de la construction du barrage.

Le niveau de la surface de saturation et le débit des percolations seront contrôlés, et les variations de turbidité ou de teneur en matériaux solides des eaux de percolation seront soigneusement observées afin de détecter à temps toute manifestation d'entraînement de matériaux.

fabric or profiled plastic sheets, etc) wrapped in spunbonded geotextile (Fig. 40 a). They are very convenient for use in the staircase-shaped drains of Fig. 18.

There are also similar drains consisting of non-deformable highly permeable material covered on the upper side by a layer of geotextile filter and on the bottom side by a layer of impermeable geomembrane (Fig. 40 b). Thus they convey infiltrating water away, preventing its access to the lower layers. They are suitable for filters at intermediate heights in tailings dams.

Drains should be constructed taking great care not to permit mixing or segregation of drain and filter materials. Special attention should be paid to the initial covering of drains by tailings to prevent slime penetration through the filters clogging and sealing them.

Drains and filters must be covered by tailings as soon as they are constructed in order to protect them from rain water, dust and water pollution, slime penetration and vegetation growth. Precautions must be taken not to allow construction machines and animals to damage them.

In severe climatic conditions, drains should be constructed in the tailings dam body at sufficient depth to prevent their freezing. The discharge structure must be laid deep in the ground downstream of the dam to prevent damage resulting from severe frost.

Seepage and leakage from tailings dams, as well as the performance of drains and filters must be monitored closely to allow measures to be taken in case of failures. Monitoring must be carried out during the whole operational period and for long time after the dam construction ceases.

The phreatic surface level and the seepage discharge should be monitored and changes in turbidity or solid substances in seepage water closely observed to detect timely evidence of piping.

10. CONCLUSION

Les percolations dans les barrages de stériles peuvent être dangereuses si elles ne sont pas parfaitement maîtrisées. Une bonne conception, des méthodes de construction appropriées, la présence d'organes d'étanchéité, de drains et de filtres permettent une telle maîtrise. Parmi tous les facteurs intervenant sur la stabilité des barrages de stériles, le drainage est celui pouvant être mis en œuvre le plus facilement, sûrement et économiquement au cours des phases du projet, de la construction et de l'exploitation.

Le drainage des barrages de stériles, de même que sa structure et sa construction, dépendent fortement des caractéristiques physiques des stériles, en particulier de leur granulométrie et du pourcentage et de l'origine des éléments fins. Comme les stériles varient beaucoup d'un barrage à un autre, de même que dans un barrage donné, le drainage adéquat est différent pour chaque barrage de stériles. Ce qui peut être excellent dans un cas particulier peut être impossible dans un autre. Le concepteur doit choisir, parmi les diverses méthodes décrites ici, la meilleure solution de drainage pour son propre barrage de stériles.

Une construction soignée et correcte des drains au cours des premières étapes de la construction du barrage constitue une assurance au moindre coût permettant d'éviter de coûteuses réparations ultérieures.

10. CONCLUSION

If not controlled adequately seepage in tailings dams can be dangerous. It can be controlled by proper design, sound construction methods, sealing, drains and filters. Of all the factors affecting tailings dam stability, drainage is the one that can be implemented most easily, safely and economically throughout design, construction and operation.

Drainage of tailings dams, as well as their structure and construction, depends strongly on the physical characteristics of the tailings, especially on their coarseness and percentage and origin of the fines. As the tailings vary very much from one to another tailings dam, as well as in one particular tailings dam, the appropriate drainage is different for every individual dam. What may be excellent for one practical case, could be impossible for other. The designer has to choose from amongst the methods described in principle here, the best drainage for his individual tailings dam.

Careful and correct drain construction during the early stages of dam construction constitutes a cheap insurance against future expensive remedial works.

ANNEXES/APPENDICES

Annexe A. Percolations à travers les
barrages de stériles
construits par la méthode
amont

Appendix A. Seepage through
upstream tailings dams

Annexe B. Références

Appendix B. References

PERCOLATIONS A TRAVERS LES BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AMONT

Les percolations à travers les barrages de stériles construits par la méthode amont diffèrent beaucoup de celles affectant les barrages en terre classiques et tous les autres types de barrages de stériles, du fait de la configuration structurale, des techniques de déversement et du zonage des matériaux particulier à ce type de barrage. Comme pour une plage du bord de mer, la longueur de la plage est comptée suivant l'axe du barrage et sa largeur de la crête jusqu'à la retenue.

Les facteurs fondamentaux relatifs aux percolations à travers les barrages de stériles construits par la méthode amont sont les suivants :

(1) Hétérogénéité dans la direction horizontale

L'hétérogénéité résulte de la ségrégation des matériaux au cours du déversement sur la plage non submergée. L'énergie du courant de boue, la pente de la plage, le diamètre des particules déposées et la perméabilité des matériaux déversés diminuent exponentiellement transversalement à la plage. Cela est prouvé théoriquement et est en accord avec les observations faites sur des barrages de stériles en cours d'exploitation (2, 15).

La variation progressive réelle de la perméabilité dans une direction horizontale peut s'exprimer de façon satisfaisante au moyen de la formule exponentielle $k(x) = k_0 e^{-ax}$, où k_0 est la perméabilité au début de la plage pour $x = 0$, a étant un coefficient déterminé dans chaque cas particulier. La Fig. 41 représente les lignes de saturation obtenues à partir de la fonction exponentielle de la variation de la perméabilité pour différents rapports $k_0/k_1 = 1, 2, 5, 10, 20$ et 100 , k_0 étant la perméabilité au début de la plage et k_1 la perméabilité à son extrémité, lorsque la distance l entre la retenue et l'organe de drainage est égale à $5H$ (H étant la hauteur du barrage de stériles). Lorsque ce rapport est plus élevé, i.e. lorsque l'hétérogénéité est plus grande, la ligne de saturation est basse et passe d'une forme convexe à une forme concave (11, 2). Les lignes 4 et 5 de la Fig. 41, pour $k_0/k_1 = 10$ et 20 , correspondent aux lignes de saturation observées dans des barrages de stériles provenant de mines de cuivre (2). Cela signifie que les lignes de saturation réelles sont $0,2H$ à $0,4H$ plus basses que celles correspondant à des barrages de stériles homogènes, ce qui conduit à des drains plus petits. Toutefois, dans le cas de plages plus étroites et de barrages de stériles plus hauts, l'influence favorable de l'hétérogénéité horizontale diminue.

La conclusion pratique est la suivante : afin d'augmenter la stabilité du barrage de stériles, les techniques de déversement devront conduire à une grande hétérogénéité horizontale. Cela est obtenu en déversant avec une boue moins consistante ou un débit plus élevé à partir d'un point de déversement. La seconde conclusion est que de larges plages doivent être conservées.

SEEPAGE THROUGH UPSTREAM TAILINGS DAMS

Seepage through upstream tailings dams differs significantly from seepage through conventional earthfill dams and all other types of tailings dams, because of the structural configuration, spigotting techniques and zoning of the material peculiar to this type of dam. Beach shape used here, following the shape of a seaside beach, has length along the dam axis and width from crest to the edge of the water pool.

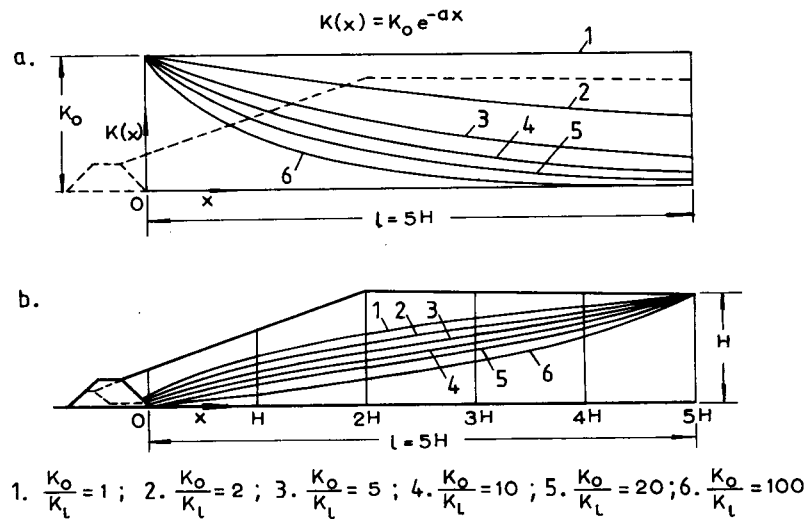
The basic factors determining the seepage process through upstream tailings dams are :

(1) Nonhomogeneity in Horizontal Direction

Nonhomogeneity is due to the segregation of the material during spigotting across the non-submerged beach. The energy of the slurry stream, the beach slope, the diameter of the deposited particles and the permeability of the spigotted material decrease exponentially across the beach. This is proved theoretically and coincides with observation on tailings dams under operation (2, 15).

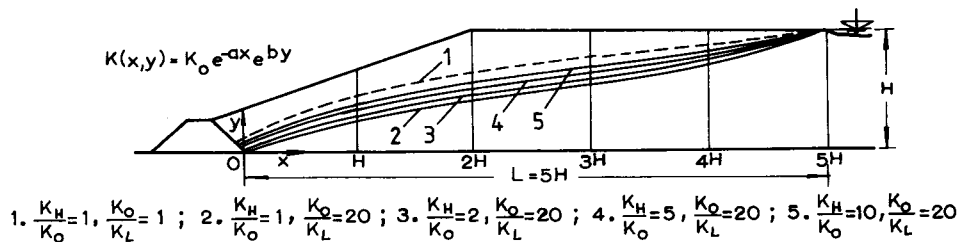
The actual gradual variation of the permeability in horizontal direction is best expressed with the exponential function $k(x) = k_0 e^{-ax}$, where k_0 is the permeability at the beginning of the beach for $x = 0$, and the coefficient "a" is to be determined for every specific case. Fig. 41 illustrates the phreatic lines drawn after the exponential function of the permeability variation for different ratios of the permeability k_0 at the beginning of the beach to permeability k_l at the end of the beach when $k_0/k_l = 1, 2, 5, 10, 20$ and 100 when the distance l from the reservoir to the drainage is $l = 5H$ (H is the height of the tailings dam). When this ratio is higher, i.e. when the nonhomogeneity is greater, the phreatic line is lower and changes from convex to concave (11, 2). The curves 4 and 5 in Fig. 41 at $k_0/k_l = 10$ and 20 correspond to the phreatic lines observed in tailings dams of the copper mines (2). This means that the actual phreatic lines are about $0.2H$ to $0.4H$ lower than for homogeneous tailings dams and therefore smaller drains are required. With narrower beaches and higher tailings dams however the favourable influence of the horizontal nonhomogeneity decreases.

All this leads also to the practical conclusion, that in order to raise the stability of the tailings dam the spigotting techniques applied should be such as to provide a greater horizontal nonhomogeneity. This is achieved by spigotting with a thinner slurry or higher discharges from one spigot. The second conclusion is that wide beaches should be maintained.



(2) Hétérogénéité dans la direction verticale

Cette hétérogénéité est due au zonage dans la direction horizontale, qui commence depuis le talus aval. Du fait de la pente du talus, une hétérogénéité dans la direction verticale se forme également. Le compactage des couches inférieures sous la charge des couches sus-jacentes contribue aussi à cet effet, spécialement dans les barrages de stériles de grande hauteur. On peut également représenter la variation de l'hétérogénéité verticale au moyen d'une fonction exponentielle. L'hétérogénéité totale est $k(x,y) = k_0 e^{-ax} e^{by}$. Les coefficients a et b sont déterminés dans chaque cas particulier suivant la ségrégation prévue, ou par analogie avec des barrages de stériles existants (1).



La Fig. 42 représente les lignes de saturation, obtenues à partir de la fonction exponentielle de la variation de la perméabilité dans les deux directions, pour une hétérogénéité horizontale $k_0/k_l = 20$ et une hétérogénéité verticale $k_h/k_0 = 1, 2, 5$, et 10. On peut constater que l'hétérogénéité verticale conduit à une surélévation de la ligne de saturation. Néanmoins, cette ligne reste au-dessous de la ligne de saturation dans un barrage homogène (ligne en tirets). Dans les cas les plus fréquents,

Fig. 41

Effect of the horizontal nonhomogeneity
Effet de l'hétérogénéité horizontale

(2) Nonhomogeneity in Vertical Direction

This is mainly due to zoning in horizontal direction which begins from the downstream slope. By virtue of the inclination of the slope, nonhomogeneity in the vertical direction is also obtained. The compaction of the lower layers by the weight of the overlying layers also contributes to this effect, especially in high tailings dams. It is also accurate to express the variation of the vertical nonhomogeneity also with an exponential function. The total nonhomogeneity is $k(x,y) = k_0 e^{-ax} e^{by}$. The coefficients “a” and “b” are determined in each specific case according to the expected segregation or by analogy with existing tailings dams (1).

Fig. 42

Horizontal and vertical nonhomogeneity
Hétérogénéité horizontale et verticale

Fig. 42 shows the phreatic lines, drawn after the exponential function of the variation of the permeability in both directions for horizontal nonhomogeneity $k_0/k_1 = 20$ and for vertical nonhomogeneity $k_h/k_0 = 1, 2, 5$ and 10. It can be seen how the vertical nonhomogeneity causes a raising of the phreatic line. Nevertheless it always remains below the phreatic line for a homogeneous dam (dashed line). In the cases most frequently met in practice $l = 5 H$ and $k_0/k_1 = 20$ which corresponds

$l = 5 H$ et $k_0/k_1 = 20$, correspondant à des barrages de stériles de hauteur moyenne. On a alors $k_h/k_0 = 5$ et l'hétérogénéité verticale entraîne une surélévation de la ligne de saturation de $0,2 H$. Toutefois, dans le cas de barrages de stériles de grande hauteur, l'hétérogénéité verticale est plus forte et provoque une surélévation beaucoup plus importante de la ligne de saturation. Cette hétérogénéité peut difficilement être influencée par des facteurs technologiques, mais doit être prise en compte dans le projet, car cela nécessite des ouvrages de drainage plus importants.

(3) Anisotropie

La perméabilité varie non seulement d'un point à un autre dans le corps du barrage, mais aussi dans la direction de l'écoulement. Elle est plus élevée dans la direction horizontale et plus faible dans la direction verticale. L'anisotropie dans les barrages de stériles est due essentiellement à deux facteurs. L'écoulement de la boue déversée a un caractère non permanent. Il dépose les particules de stériles le long de son parcours et change continuellement de position sur la plage. Cela conduit à une alternance continue de couches minces de quelques millimètres d'épaisseur de matériaux fins et de matériaux grossiers. L'effet de ces couches minces est équivalent à une anisotropie k_x/k_y atteignant 4 à 5 au début de la plage et 2 à 3 à la retenue. Cette anisotropie est inévitable et on ne peut agir sur sa formation. L'autre facteur, plus important, est d'ordre technologique. Toutes imperfections dans les techniques de déversement (déversement continu en un point et formation d'écoulement de boues à travers la plage, submersion de la plage par la retenue, débit variable de déversement, variation de la densité des boues) conduisent à des couches plus grandes, de plusieurs centimètres d'épaisseur, de matériaux fins et de matériaux grossiers. Les couches de matériaux fins agissent comme des tapis imperméables, tandis que les couches de matériaux grossiers, de perméabilité plus élevée, provoquent des chemins de forte percolation. L'effet de ces couches équivaut à une augmentation de l'anisotropie qui peut atteindre des valeurs élevées $k_x/k_y = 20$. Toute surélévation importante de la surface de saturation ou émergence des percolations sur le talus résultent de telles imperfections dans les techniques de déversement.

L'anisotropie a deux effets. Le talus amont presque horizontal, qui a un effet favorable dans le cas de l'anisotropie, abaisse encore davantage la ligne de saturation à son origine dans la retenue. Cependant, l'anisotropie est plus faible à cet endroit. De plus, du fait de la percolation horizontale, la ligne de saturation commence à monter par suite de l'anisotropie, la surélévation étant plus forte à l'extrémité du chemin d'écoulement près du remblai d'amorce drainant. L'anisotropie nécessite des ouvrages de drainage de hauteur k_x/k_y fois plus élevée. La Fig. 43 indique l'influence de divers degrés d'anisotropie constante, en considérant que la zone de percolation est homogène et en tenant compte de la quasi-horizontalité du talus amont.

L'influence de l'anisotropie est fortement limitée par l'hétérogénéité horizontale. La ligne de saturation et, en particulier, son extrémité se trouvant à un niveau plus bas du fait de l'hétérogénéité horizontale, l'anisotropie entraîne également une surélévation moindre. Cela est représenté sur la Fig. 44, où l'influence du talus amont horizontal n'est pas prise en compte. On peut constater que l'effet de l'anisotropie est moindre dans le cas d'une hétérogénéité horizontale plus grande. L'effet de l'anisotropie augmente toutefois avec l'hétérogénéité verticale.

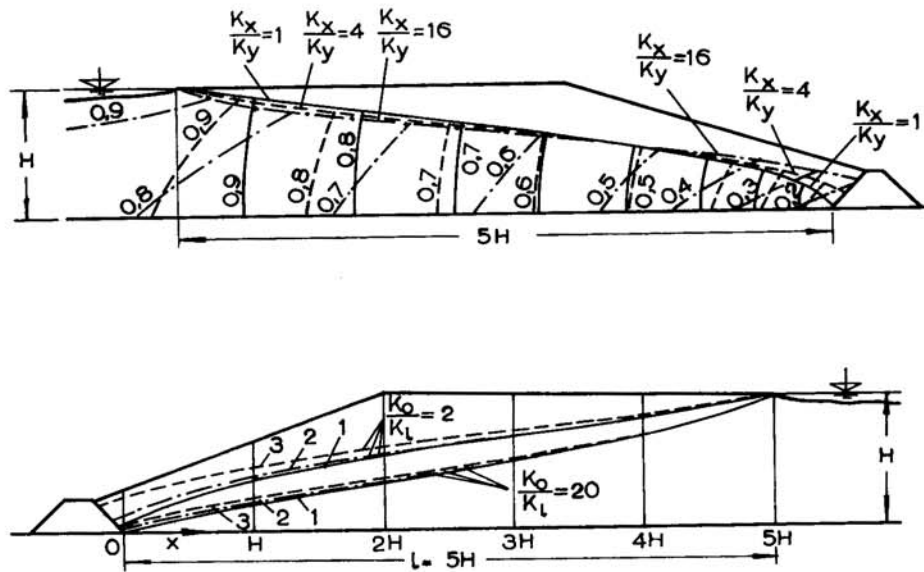
to tailings dams up to medium height. Then the ratio $k_h/k_0 = 5$ and the vertical nonhomogeneity causes a raising of the phreatic line to $0.2 H$. In the case of high tailings dams however the vertical nonhomogeneity is greater and causes a much higher raising of the phreatic line. This nonhomogeneity can hardly be influenced by technological factors but should certainly be taken into account in the design, since it requires larger drainage structures.

(3) Anisotropy

Permeability varies not only from point to point within the dam body, but also in the direction of flow. It is highest in horizontal and lowest in vertical directions. Anisotropy in tailings dams is due mainly to the two factors. The spigotted slurry stream has a non-steady character. It deposits tailings particles along its route and therefore continuously changes its position over the beach. This leads to a continuous alternation of very thin layers of several millimetres of fine and coarse material. The effect of these thin layers is equivalent to anisotropy of up to $k_x/k_y = 4$ to 5 at the beginning of the beach and up to 2 to 3 at the pond. This anisotropy is inevitable and nothing can be done about its formation. The other factor which is much stronger is technological. All short-comings in the spigotting techniques (continuous spigotting in one place and the formation of slurry streams across the beach, submergence of the beach from the reservoir, spigotting of varying discharge, variation in the slurry density) lead to the formation of larger interlayers of several centimetres of fine and coarse material. The layers of fine material have the effect of an impermeable floor, while the layers of coarser material with a higher permeability produce paths of intense seepage. The influence of these layers is equivalent to an increased anisotropy, which may reach higher values, even much more than $k_x/k_y = 20$. Every considerable raising of the phreatic surface or emergence of the seepage flow on the slope is the result of such short-comings in the spigotting techniques.

Anisotropy exercises a two-way influence. The nearly horizontal upstream slope, which has a favourable effect in case of anisotropy, draws down the phreatic line still more at its beginning at the pond. There however anisotropy is lower. Further on, because of the horizontal seepage flow, the phreatic line begins to rise due to anisotropy, the raising being highest at the end of the stream near the draining starter dam. Anisotropy requires k_x/k_y times higher drainage structures. Fig. 43 shows the influence of the various degrees of constant anisotropy under the condition that the seepage area is homogeneous, also taking into account the nearly horizontal upstream slope.

The influence of anisotropy is strongly limited by the horizontal nonhomogeneity. Since due to the horizontal nonhomogeneity the phreatic line, and particularly its end, lies lower, then it also is raised less as a result of anisotropy. This is shown in Fig. 44, where the influence of the horizontal upstream slope is not taken into account. It can be seen that the influence of anisotropy is less with a greater horizontal nonhomogeneity. The effect of the anisotropy however increases with the vertical nonhomogeneity.



L'anisotropie entraîne une déformation du réseau d'écoulement en inclinant fortement les lignes équipotentiellles (Fig. 42 et 43), ce qui conduit à une réduction de la pression interstitielle, favorable à la stabilité des barrages de stériles. Cela compense beaucoup l'effet négatif de l'anisotropie sur la stabilité statique, mais non son effet négatif sur la stabilité dynamique et sur le risque de liquéfaction qui est augmenté. Aussi est-il nécessaire, lors de l'étude des percolations, de définir, non seulement la ligne de saturation, mais également le réseau d'écoulement.

(4) Talus amont presque horizontal

Le talus amont presque horizontal a un effet favorable sur le niveau de la ligne de saturation et sur la stabilité des barrages de stériles. La profondeur de la retenue est d'environ 0,5 à 3 m et très petite par rapport à la hauteur de l'ouvrage. La zone appelée « fragment d'entrée » (« entrance fragment ») est située sous la retenue, là où la direction de l'écoulement passe de la verticale à l'horizontale. Cela s'accompagne de pertes de charge et d'un abaissement de la ligne de saturation à son origine. L'hétérogénéité et l'anisotropie augmentent cet effet favorable.

(5) Infiltration depuis la plage

Les percolations sont alimentées non seulement par la retenue, mais aussi par les infiltrations sur la plage dans les zones où le déversement est mis en œuvre. Le déversement ayant lieu périodiquement en divers points le long de la plage et jamais le long du front entier de déversement, l'infiltration depuis la plage n'entraîne qu'une surélévation locale de la ligne de saturation. Lorsque l'eau, infiltrée depuis la zone de déversement sur la plage, atteint le réseau principal de percolation, elle le surélève en l'étalant dans toutes les directions horizontales. Ce processus complexe tri-dimensionnel est difficile à étudier. L'intensité des infiltrations depuis la plage dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que le schéma du

Fig. 43

Seepage at different anisotropy
Écoulement pour différentes anisotropies

Fig. 44

Effect of nonhomogeneity and anisotropy
Effet de l'hétérogénéité et de l'anisotropie

Anisotropy causes a deformation of the hydrodynamic flow net by tilting the equipotential lines considerably (Fig. 42 and 43), resulting in the reduction of the hydrodynamic pressure, favourable for tailings dam stability. This compensates to a high degree the negative effect of anisotropy on the static stability, but not its negative influence on the dynamic stability and the increased danger of liquefaction. Therefore this is another reason when studying the seepage processes why, not only the phreatic line, but also the flow net should be defined.

(4) Nearly Horizontal Upstream Slope

The nearly horizontal upstream slope has a favourable influence on the level of the phreatic line and on the stability of the tailings dam. The depth of the water pool is of the order of 0.5 - 3.0 m and is small compared to the height of the structure. The so-called "entrance fragment" is formed under the water pool, where the direction of flow changes from vertical to horizontal. This is accompanied by head losses and a drawdown of the phreatic line at its very beginning. Its favourable effect is increased by the nonhomogeneity and the anisotropy.

(5) Infiltration from the Beach

The seepage flow is fed not only from the pond, but also from infiltration through the beach at the sites where spigotting is currently carried out. Since spigotting occurs periodically at different locations along the beach and never along the entire spigotting front, the inflow from the beach causes only local raising of the phreatic line. When the water, infiltrated from the spigotting site of the beach, reaches the main seepage stream, it raises it by spreading in all horizontal directions. This complex three-dimensional process is difficult to study. The intensity of infiltration from the beach depends on a number of factors, such as the pattern of spigotting, the discharge flow of the slurry, its relative discharge, the

déversement, le débit de déversement des boues, la perméabilité et la rugosité des stériles, la pente et la largeur de la plage, etc. L'influence de ces facteurs n'est cependant pas connue et, à ce jour, n'a pu être établie. Seules certaines valeurs de surélévation de la ligne de saturation, pour des déversements effectués sur des barrages de stériles en Bulgarie, sont connues. Par exemple, sur des barrages de stériles, où le débit total de boues est d'environ 100 l/s et les premiers stériles ont $60 \% < 0,074 \text{ mm}$ et $5 \% < 0,005 \text{ mm}$, la surélévation de la ligne de saturation au point de déversement atteint 0,75 m. Pour des barrages de stériles, où le débit total de boues provenant de 15 points de rejet, équidistants de 10 m, est d'environ 900 l/s, si le déversement à un point donné est accidentellement prolongé, la surélévation de la ligne de saturation peut atteindre 4 m à 5 m.

En vue de réduire la surélévation de la ligne de saturation résultant des infiltrations depuis la plage, le déversement en un même point ne doit pas durer trop longtemps. D'autres avantages tirés du déplacement fréquent du point de déversement sont, d'une part, une réduction du développement des écoulements transversaux à la plage, qui forment des couches de matériaux fins et augmentent l'anisotropie, et des écoulements secondaires qui émergent sur le talus, et, d'autre part, une humidification plus étendue de la zone de plage, d'où une réduction des poussières. Une répartition uniforme des boues déversées sur la plage est souhaitable, ce qui peut être facilité par l'utilisation de rampes d'aspersion.

(6) Largeur de la plage

La largeur de la plage, ou la distance entre la retenue et l'ouvrage de drainage, est le paramètre le plus spécifique et le plus important intervenant dans les barrages de stériles. Les percolations et la stabilité dépendent presque entièrement de ce paramètre. L'évaluation de cette dimension est une étape essentielle dans le projet. Au cours du projet, les problèmes suivants se présentent à propos de la largeur de la plage et de la distance entre la retenue et l'ouvrage de drainage.

a. Évaluation de la largeur de la plage dans des conditions normales.

Cela dépend principalement des conditions topographiques. Afin d'obtenir un zonage satisfaisant des matériaux au cours du déversement, la plage non submergée doit être assez large pour permettre le dépôt de 50 à 80 % des stériles, mais il faut également s'assurer qu'il y a une longueur et une surface suffisantes de retenue de décantation pour réduire la turbidité. Ces deux exigences sont contradictoires et il faut donc trouver un compromis acceptable, en particulier au cours des phases initiales.

b. Évaluation d'une largeur minimale acceptable dans le cas de hautes eaux ou de pluies torrentielles.

Les ouvrages d'évacuation doivent avoir une capacité suffisante pour assurer une largeur minimale de plage permettant un zonage satisfaisant des stériles, même au cours des toutes premières phases. De cette façon, la zone inférieure du barrage de stériles est constituée de stériles grossiers qui garantissent sa stabilité à la hauteur maximale de construction. La ligne de saturation devra se situer à un niveau bas pour assurer la stabilité et éviter tout danger d'entraînement de matériaux.

permeability of the tailings and its roughness, the inclination and width of the beach, etc. The influence of these factors however is not known and cannot be established as yet. Only certain values of rise in the phreatic line at the site of spigotting of some tailings dams in Bulgaria are known. For example in tailings dams with a total slurry discharge of about 100 l/s and initial tailings with 60 % < 0.074 mm and 5 % < 0.005 mm the rise of the phreatic line at the site of spigotting is up to 0.75 m. In tailings dams with a total slurry discharge of 900 l/s from 15 outlets with distance between them 10 m, if the spigotting at a given site is inevitably prolonged, then the phreatic line rises up to 4-5 m.

In order to reduce the rise in the phreatic line due to infiltration from the beach, spigotting at the same site should not continue too long. Other benefits from moving the spigotting location frequently are a reduction in the development of streams transverse to the beach, which form layers of fine material and increase the anisotropy and secondary streams, which emerge on the slope and more extensive wetting of the beach area and hence reduction in dusting. Clearly, a uniform distribution of the spigotted slurry on the beach is desirable, as may be assisted by the use of spray bars.

(6) Width of the Beach

The width of the beach or the distance from the pond to the drainage is the most important and specific parameter in tailings dams. Seepage and stability depend almost entirely on it. The evaluation of this dimension is a most essential step in design. The following problems arise in design concerning the width of the beach and the distance from the reservoir to the drainage.

a. Evaluation of the beach width under normal conditions.

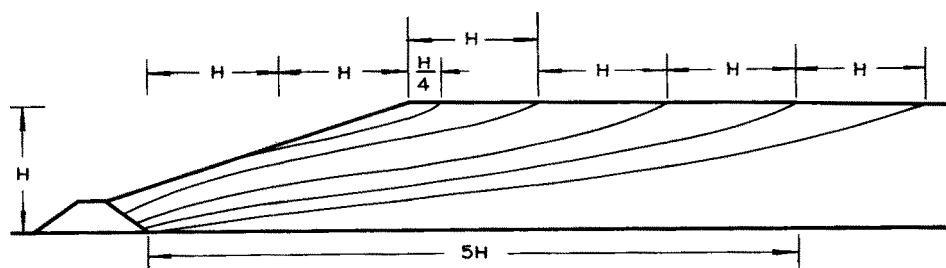
This depends mainly on the topographic conditions. In order to obtain a satisfactory zoning of the material during spigotting, the width of the unsubmerged beach should be as great as to secure the deposition of 50 - 80 % of the tailings but it is also necessary to ensure that there is a sufficient length and area of the settling pond for reduced turbidity. These two requirements are contradictory and therefore a reasonable compromise between them is sought, especially during the initial stages.

b. Evaluation of a minimum possible width of the beach in case of flood water or torrential rain.

The spillway structures should possess a sufficient capacity to provide such a minimum width of beach to ensure a satisfactory zoning of the tailings even during the very first stages. In this way the lower part of the tailings dam is built of coarse tailings which secure its stability at the maximum construction height. The phreatic line should lie low to ensure the stability and to avoid any danger of piping.

c. L'équilibre entre les matériaux sur la plage et les matériaux dans la retenue sera déterminé pour plusieurs niveaux de construction du barrage de stériles, spécialement dans les phases initiales, afin d'obtenir une largeur minimale de plage ayant une proportion suffisante de stériles grossiers pour garantir la stabilité à la hauteur maximale de construction.

L'influence de la largeur de la plage sur la position de la ligne de saturation est indiquée sur la Fig. 45. Les effets de l'hétérogénéité et de l'anisotropie sont inclus. En général, la tendance sera de maintenir la plage aussi large que possible; en effet, plus la plage sera large, plus la stabilité sera grande et plus la quantité d'eau de percolation sera faible. En cours de projet, il est nécessaire de procéder plusieurs fois aux trois vérifications a, b, et c, jusqu'à l'obtention de la meilleure solution technique et économique. S'il s'avère impossible d'obtenir une largeur minimale de plage, on doit trouver d'autres solutions techniques pour accroître la plage non submergée. Si ce n'est pas possible, il faudra ajouter des drains.



c. Tailing balance on the beach and in the pond should be evaluated for several heights of tailings dam construction, especially in the initial stages, to obtain a minimum beach width with an adequate part of coarse tailings guaranteeing the stability for maximum construction height.

The influence of the beach width on the position of the phreatic line is demonstrated on Fig. 45. The influence of the nonhomogeneity and the anisotropy are included. In general the tendency should be towards maintaining the beach as wide as possible, since the wider the beach the higher the stability and the lower the seeped water quantity. In the course of design it is necessary to conduct these three checks a, b and c several times in different sequence, until the best technical and economic solution is obtained. If it proves impossible to obtain a minimum beach width, additional structural solutions have to be found for extending the non-submerged beach. If this is not possible then additional drains will be required.

Fig. 45

Effect of the beach width on seepage
Effet de la largeur de la plage sur l'écoulement

REFERENCES

1. ABADJIEV, C. B. (1976), About the Seepage in Smoothly Variable Nonhomogeneous Medium of Tailings Dams, Sofia, Technicheska Misl, 3, pp. 40-50 (Bulgarian Text).
2. ABADJIEV, C. B. (1976), Seepage through Mill Tailings Dams. Trans. 12th Congress of ICOLD, Mexico, Q. 44-R. 18, vol. 1, pp. 381-393.
3. ABADJIEV, C. B. (1985), Improved Upstream Construction of Tailings Dams, Proc. of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, pp. 1235-1236.
4. ABADJIEV, C. B. and KALCHEV, I. S. (1990), Investigation of Geotextiles as Filter in Hydraulic Fill Tailings Dams, Proc., Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, 28 May - 1 June, pp. 307-310.
5. BERTRAM, G. E. (1940), An Experimental Investigation of Protective Filters, Harvard University, Cambridge/Mass. Publication 267, Series 7.
6. BRAUNS, J. (1990), Filters and Drains, Contribution to NATO Advanced Study Institute, Advances in Rockfill Structures, Lisbon.
7. FEDOROV, I. S. and SACHAROV, M. N. (1985), Tailings Disposal. Nedra, Moscow, 228 p. (Russian Text).
8. International Commission on Large Dams (1994), Embankment Dams - Granular Filters and Drains. Bulletin No. 95.
9. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Technical Committee on Filters. Report on Filters (Revised draft August 1987).
10. KARPOFF, C. D. (1955), The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filters, Proc. American Society for Testing Materials, Vol. 55, pp. 1183-1198.
11. KEALY, C. D. and WILLIAMS R. E. (1971), Flow through a Tailings Pond Embankment, Water Resources Research, Vol. 7, No 1.
12. KLOHN, E. J. (1972), Design and Construction of Tailings Dams, The Canadian Mining and Metallurgical, April, pp. 28-44.
13. KOZENY, J. (1953), Hydraulik, Springer Verlag, Wien, 588 p.
14. Manual of Tailings Dams and Dumps (1982), ICOLD Bulletin 45, 236 p.
15. MELENTIEV, V. A. , KOLPASHNIKOV, N. P. and VOLNIN, B. A. (1973), Hydraulic Filled Structure, Moscow, Energia, 247 p. (Russian Text).
16. PETER, P. and others (1983), Design and Construction of Tailings Deposits, Edition of Technical and Economical Literature, Bratislava, CSSR, 312 p. (Slovak Text).

17. Pit Slope Manual, Chapter 9, Waste Embankment (1977), Mineral Research Program CANMET Report 77-01, 137 p.
18. PRAVEDNII, G. C. (1991), Filters in Hydraulic Structures. Design Recommendations P. 56-90, VNIIG, St. Petersburg, 107 p. (Russian Text).
19. SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P. (1986), Guide for determining the gradation of sand and gravel filters. Soil Mechanics Note 1, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
20. SODERBERG, P. L. and BUSCH, R. A. (1977), Design Guide for Metal and Nonmetal Tailings Disposal, US Dept of the Interior Bureau of Mines I.C. 8755, 136 p.
21. TERZAGHI, K. and PECK, R. B. (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, J. Wiley, New York.
22. THANIKACHALAM, V. and SAKTHIVADIVEL (1974), Rational Design Criteria for Protective Filters, Canadian Geotechnical Journal 11, pp. 309-314.
23. US Department of the Interior Bureau of Reclamation (1987), Design Standards, Embankment Dams, No 13, Chapter 5, Protective Filters.
24. US Department of the Army, Corps of Engineers (1986), Engineering and Design - Seepage Analysis and Control for Dams, EM 1110-2-1901.
25. VAUGHAN, P. R. and SOARES H. F. (1982), Design of Filters for Clay Cores of Dams, Proc. ASCE, Journal of Geotechn. Eng. 108, 1, pp. 17-31.
26. VICK, S. G. (1983), Planning, Design and Analysis of Tailings Dams, J. Wiley, 369 p.
27. WITT, K. J. (1986), Filtrationsverhalten und Bemessungen von Erdstoff-Filtern, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 104.
28. ZIEMS, J. (1968), Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe, Dissertation, TU Dresden.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : novembre 1994
N° 16983
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>**