

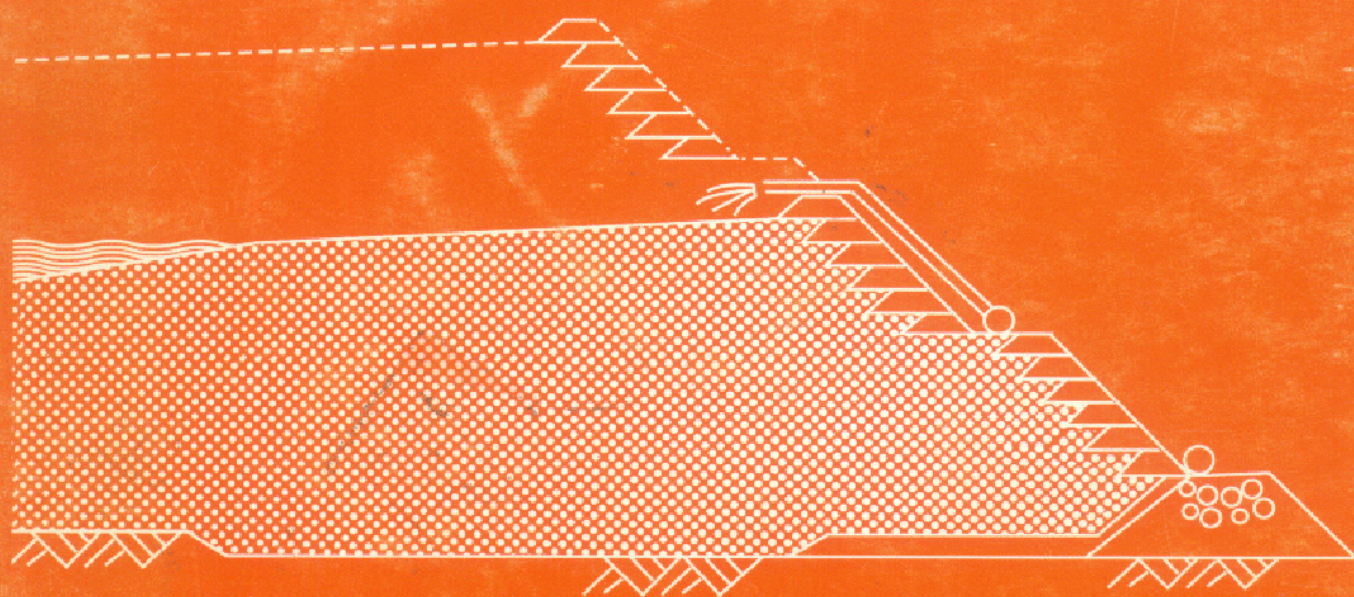
A GUIDE TO TAILINGS DAMS AND IMPOUNDMENTS

Design, construction, use and rehabilitation

GUIDE DES BARRAGES ET RETENUES DE STÉRILES

*Conception, construction, exploitation
et réhabilitation*

Bulletin 106



1996



**UNEP
PNUE**

The cover illustration is reproduced from Fig. 12 of the Bulletin:
Embankment construction using the “spigot” disposal method.

*L'illustration de couverture reproduit la Fig. 12 du Bulletin :
Construction du remblai au moyen de buses de déversement (« spigots »).*

Original text in English

French translation by Y. Le May,
with the assistance from J.-M. Dupas.

Texte original en anglais

*Traduction en français par Y. Le May,
avec la collaboration de J.-M. Dupas.*

A GUIDE TO TAILINGS DAMS AND IMPOUNDMENTS

Design, construction, use and rehabilitation

GUIDE DES BARRAGES ET RETENUES DE STÉRILES

*Conception, construction, exploitation
et réhabilitation*

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 53 75 16 22 - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

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

<i>Chairman/Président</i> Great Britain/Grande-Bretagne	A.D.M. PENMAN
<i>Members/Membres</i>	
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. RÜGGERI (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

PRÉFACE

MESSAGE D'INTRODUCTION
DU PROGRAMME
DES NATIONS UNIES
POUR L'ENVIRONNEMENT

1. INTRODUCTION
2. TECHNIQUES DE MISE
EN DÉPÔT DES STÉRILES
3. CONCEPTION DES
BARRAGES DE STÉRILES
4. CONTRÔLE DES TRAVAUX ET
EXPLOITATION
5. MESURES CORRECTIVES
6. RÉHABILITATION
ET FERMETURE
7. RÉGLEMENTATION
8. RÉFÉRENCES

ANNEXES

PROGRAMME
DES NATIONS UNIES
POUR L'ENVIRONNEMENT /
CENTRE INDUSTRIE
ET ENVIRONNEMENT -
HISTORIQUE

CONTENTS

FOREWORD

PREFACE

INTRODUCTORY MESSAGE
FROM THE UNITED NATIONS
ENVIRONMENTAL
PROGRAMME

1. INTRODUCTION
2. TAILINGS DISPOSAL SYSTEM
3. DESIGN CONSIDERATIONS
4. CONSTRUCTION CONTROL
AND OPERATION
5. REMEDIAL WORKS
6. REHABILITATION
AND CLOSURE
7. REGULATIONS
8. REFERENCES

APPENDICES

ABOUT UNEP INDUSTRY
AND ENVIRONMENT
CENTRE

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	14
PRÉFACE.....	16
MESSAGE D'INTRODUCTION DU PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT	18
1. INTRODUCTION.....	28
1.1. Définition des stériles.....	28
1.2. Provenance des stériles.....	28
1.3. Propriétés des stériles.....	30
1.4. Méthodes de dépôt des stériles.....	30
1.5. Définition des barrages de stériles.....	30
1.6. Importance des stériles et des barrages de stériles	32
1.7. Contenu du guide	34
2. TECHNIQUES DE MISE EN DÉPÔT DES STÉRILES.....	36
2.1. Principes généraux	36
2.2. Les diverses opérations.....	44
2.2.1. Transport des stériles.....	46
2.2.2. Remblais d'endiguement	46
2.2.3. Limites d'application de la méthode amont de construction.....	70
2.2.4. Dérivation des ruissellements naturels.....	70
2.2.5. Mise en dépôt dans la retenue	74
2.2.6. Évacuation de l'eau de surverse.....	76
2.2.7. Maîtrise de la pollution.....	82
3. CONCEPTION DES BARRAGES DE STÉRILES	88
3.1. Généralités	88
3.2. Recommandations concernant la conception et la construction.....	88
3.3. Reconnaissances du site	90
3.4. Matériaux mis en dépôt.....	92
3.5. Propriétés des matériaux granulaires - Principes fondamentaux.....	98
3.6. Prise en compte des fondations	100
3.7. Prise en compte des séismes.....	102
3.8. Conception des barrages constitués principalement de stériles	102

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	15
PREFACE.....	17
INTRODUCTORY MESSAGE FROM THE UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME	19
1. INTRODUCTION	29
1.1. What are tailings?	29
1.2. Where do tailings come from?.....	29
1.3. What are the properties of tailings?.....	31
1.4. How are tailings disposed?	31
1.5. What are tailings dams?.....	31
1.6. How extensive are tailings and tailings dams?.....	33
1.7. How to use this Guide	35
2. TAILINGS DISPOSAL SYSTEMS	37
2.1. General concepts	37
2.2. System components	45
2.2.1. Delivery system.....	47
2.2.2. Confining embankments.....	47
2.2.3. Limitations of the upstream method	71
2.2.4. Diversion of natural run-off.....	71
2.2.5. Deposition in the impoundment.....	75
2.2.6. Removal of supernatant fluid.....	77
2.2.7. Pollution control.....	83
3. DESIGN CONSIDERATIONS.....	89
3.1. General	89
3.2. Design and construction recommendations.....	89
3.3. Site investigation	91
3.4. Material for disposal.....	93
3.5. Properties of particulate materials - basic concepts	99
3.6. Foundation considerations	101
3.7. Earthquake considerations	103
3.8. The design of dams constructed mainly from tailings	103

3.9. Barrages construits par la méthode amont.....	104
3.9.1. La plage.....	104
3.9.2. Paramètres de résistance.....	106
3.9.3. Pressions interstitielles et drainage.....	106
3.10. Barrages construits par la méthode des bassins (enclos)	110
3.11. Barrages construits par les méthodes aval et de l'axe central.....	112
3.12. Barrages construits avec des remblais d'emprunt.....	114
4. CONTRÔLE DES TRAVAUX ET EXPLOITATION.....	116
4.1. Position du problème.....	116
4.1.1. Conditions climatiques	116
4.1.2. Type de stériles.....	116
4.2. Ouvrages de décantation.....	118
4.2.1. Tour verticale et conduite sous remblai	118
4.2.2. Coursier sur le versant de la vallée et conduite d'évacuation	118
4.2.3. Conduite allongée progressivement	118
4.2.4. Pompe flottante.....	120
4.3. Drainage interne	122
4.3.1. Nécessité de recueillir les eaux de percolation	124
4.3.2. Revêtement artificiel étanche.....	124
4.3.3. Puits filtrants	126
4.3.4. Mesure des débits de percolation.....	126
4.4. Remblai d'amorce	128
4.5. Construction par la méthode amont.....	128
4.5.1. Formation de la plage	128
4.5.2. Construction des petites digues et des drains.....	132
4.5.3. Mesure des caractéristiques	132
4.6. Construction par la méthode aval	134
4.6.1. Mise en dépôt sur le talus aval	134
4.6.2. Mesure des caractéristiques	134
4.7. Construction utilisant l'assèchement des stériles.....	136
4.7.1. Utilisation d'autres matériaux.....	136
4.8. Protection des talus	138
4.8.1. Débris de roche.....	138
4.8.2. Végétation	138
4.8.3. Contrôle des travaux et auscultation	140
4.9. Assurance de la qualité.....	140
5. MESURES CORRECTIVES	142
5.1. Introduction	142
5.2. Les divers problèmes susceptibles de se présenter	142

3.9. Dams constructed by the “upstream” method	105
3.9.1. The beach	105
3.9.2. Strength parameters	107
3.9.3. Pore pressures and drainage	107
3.10. Dams constructed by the “paddock” method	111
3.11. Dams built by the “downstream” and “centreline” methods	113
3.12. Dams built with borrowed fill	115
4. CONSTRUCTION CONTROL AND OPERATION	117
4.1. Given conditions	117
4.1.1. Climatic conditions	117
4.1.2. Type of tailings	117
4.2. Decant arrangements	119
4.2.1. Vertical tower and culvert	119
4.2.2. Valleyside chute and culvert	119
4.2.3. Extended culvert	119
4.2.4. Pump barge	121
4.3. Under drainage	123
4.3.1. Need for seepage collection	125
4.3.2. Impervious artificial liner	125
4.3.3. Filter wells	127
4.3.4. Seepage measurement	127
4.4. Starter dam	129
4.5. Upstream construction	129
4.5.1. Development of the beach	129
4.5.2. Dyke and drain construction	133
4.5.3. Measurement of properties	133
4.6. Downstream construction	135
4.6.1. Deposition on the downstream slope	135
4.6.2. Measurement of properties	135
4.7. Construction using de-watering tailings	137
4.7.1. Introduction of other materials	137
4.8. Slope protection	139
4.8.1. Waste rockfill	139
4.8.2. Vegetation	139
4.8.3. Inspection and monitoring	141
4.9. Quality assurance	141
5. REMEDIAL WORKS	143
5.1. Introduction	143
5.2. Review of problems which can occur	143

5.2.1. Introduction	142
5.2.2. Déversement	142
5.2.3. Instabilité des talus	146
5.2.4. Érosion interne due aux percolations	146
5.2.5. Érosion externe	148
5.2.6. Dégâts d'origine sismique	148
5.2.7. Dégâts causés aux ouvrages de décantation	150
5.2.8. Pollution de la nappe phréatique	150
5.3. Mesures correctives	152
5.3.1. Introduction	152
5.3.2. Déversement - mesures correctives	152
5.3.3. Instabilité des talus - mesures correctives	152
5.3.4. Érosion interne due aux percolations - mesures correctives	156
5.3.5. Érosion externe - mesures correctives	156
5.3.6. Dégâts d'origine sismique - mesures correctives	158
5.3.7. Dégâts causés aux ouvrages de décantation - mesures correctives	158
5.3.8. Pollution de la nappe phréatique - mesures correctives	160
6. RÉHABILITATION ET FERMETURE	164
6.1. Introduction	164
6.2. Considérations économiques	166
6.3. Principaux objectifs	168
6.4. Stabilisation	168
6.4.1. Stabilité des talus	168
6.4.2. Séismologie	170
6.4.3. Protection contre l'érosion	170
6.4.4. Dispositifs de drainage	170
6.5. Hydrologie	172
6.6. Pollution	174
6.6.1. Maîtrise des percolations	174
6.6.2. Qualité des eaux de surface	174
6.6.3. Contrôle des poussières	176
6.7. Impact visuel	176
6.8. Restauration	178
6.9. Sécurité	178
6.9.1. Accès public	178
6.9.2. Auscultation et surveillance	180
7. RÉGLEMENTATION	182
7.1. Royaume-Uni : Législation relative à la planification	182
7.1.1. Évaluation des effets sur l'environnement	186

5.2.1. Introduction	143
5.2.2. Overtopping.....	143
5.2.3. Slope instability.....	147
5.2.4. Internal erosion by seepage	147
5.2.5. External erosion.....	149
5.2.6. Earthquake damage	149
5.2.7. Damage to decant systems.....	151
5.2.8. Groundwater pollution.....	151
5.3. Remedial works	153
5.3.1. Introduction	153
5.3.2. Overtopping - remedial works	153
5.3.3. Slope instability - remedial works	153
5.3.4. Internal erosion by seepage - remedial works	157
5.3.5. External erosion - remedial works.....	157
5.3.6. Earthquake damage - remedial works.....	159
5.3.7. Damage to decant system - remedial works	159
5.3.8. Groundwater pollution - remedial works.....	161
6. REHABILITATION AND CLOSURE	165
6.1. Introduction	165
6.2. Economic considerations	167
6.3. Principal objectives.....	169
6.4. Stabilisation	169
6.4.1. Slope stability.....	169
6.4.2. Seismology	171
6.4.3. Erosion protection	171
6.4.4. Drainage systems.....	171
6.5. Hydrology.....	173
6.6. Contamination	175
6.6.1. Seepage control	175
6.6.2. Surface water quality	175
6.6.3. Dust control.....	177
6.7. Visual impact	177
6.8. Restoration.....	179
6.9. Safety.....	179
6.9.1. Public access	179
6.9.2. Monitoring and surveillance.....	181
7. REGULATIONS	183
7.1. United Kingdom planning law.....	183
7.1.1. Environmental assessment.....	187

7.2. Royaume-Uni : Législation relative au contrôle de la pollution	186
7.2.1. Contrôle global de la pollution	186
7.2.2. Qualité de l'air	188
7.2.3. Qualité de l'eau	188
7.2.4. Gestion des déchets	190
7.3. Royaume-Uni : Législation relative à la sécurité	192
7.3.1. Dépôts relevant de la Partie I	194
7.3.2. Dépôts relevant de la Partie II	208
7.3.3. Autre législation relative à la sécurité	208
7.4. Règlements dans d'autres pays	208
7.4.1. Communauté Européenne	210
7.4.2. Afrique du Sud	212
7.4.3. Canada	214
7.4.4. États-Unis	218
7.4.5. Australie	220
7.5. Remarques finales	220
8. RÉFÉRENCES	224
ANNEXES	227
Annexe A : Stabilité	228
Annexe B : Glossaire	236
PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT/CENTRE INDUSTRIE ET ENVIRONNEMENT - HISTORIQUE	238

7.2. United Kingdom pollution control law	187
7.2.1. Integrated pollution control	187
7.2.2. Air quality	189
7.2.3. Water quality	189
7.2.4. Waste management	191
7.3. United Kingdom safety law	193
7.3.1. Part I tips	195
7.3.2. Part II tips.....	209
7.3.3. Other safety legislation.....	209
7.4. Regulations in other countries	209
7.4.1. European Community.....	211
7.4.2. South Africa	213
7.4.3. Canada.....	215
7.4.4. United States of America.....	219
7.4.5. Australia	221
7.5. Concluding remarks.....	221
8. REFERENCES.....	224
APPENDICES	227
Appendix A: Stability.....	229
Appendix B: Glossary	237
ABOUT UNEP INDUSTRY AND ENVIRONMENT CENTRE	239

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig. 1 — Dépôt dans une excavation désaffectée
Fig. 2 — Site de dépôt en vallée
Fig. 3 — Site de dépôt en dehors d'une vallée
Fig. 4 — Barrage en remblai classique - Type A
Fig. 5 — Remblai classique construit par étapes - Type B
Fig. 6 — Remblai construit par étapes, avec zone amont imperméable - Type C
Fig. 7 — Remblai avec zone imperméable en stériles - Type D
Fig. 8 — Classification granulométrique type obtenue par hydrocyclone
Fig. 9 — Construction du remblai par la méthode aval - Type E₁
Fig. 10 — Construction du remblai par la méthode de l'axe central - Type E₂
Fig. 11 — Construction du remblai par la méthode amont, au moyen d'hydrocyclones - Type E₃
Fig. 12 — Construction du remblai au moyen de buses de déversement (spigots) - Type F₁
Fig. 13 — Construction du remblai par la méthode « semi-aérienne » - Type F₂
Fig. 14 — Construction du remblai utilisant la méthode des enclos (bassins) - Type F₃
Fig. 15 — Dispositifs caractéristiques de dérivation
Fig. 16 — Schéma d'une tour de décantation
Fig. 17 — Schéma d'un coursier de décantation
Fig. 18 — Barge de pompage
Fig. 19 — Courbes granulométriques de stériles
Fig. 20 — Conduite de décantation allongée progressivement
Fig. 21 — Enregistrement automatique des débits de percolation
Fig. 22 — Construction des petites digues
Fig. 23 — Remblai constitué de cendres volantes « conditionnées »
Fig. A.1. — Résistance au cisaillement représentée sur le diagramme de Mohr
Fig. A.2. — Stabilité d'un barrage de stériles construit par la méthode amont
- Tableau 1. — Types et causes de défauts - Possibilités de détection d'un risque de rupture, par inspection et/ou auscultation
Tableau 2. — Mesures correctives possibles pour résoudre des problèmes d'instabilité de talus
Tableau 3. — Sommaire des mesures de maîtrise des percolations, destinées à éviter ou réduire la pollution de la nappe phréatique
Tableau 4. — Sommaire des prescriptions d'inspection et d'établissement de rapports, conformément à la Partie I des Règlements des Mines et Carrières (Dépôts), de 1971 (Royaume-Uni)
Tableau 5. — Principales prescriptions concernant le contenu des rapports, plans, etc., conformément aux Règlements - 1971 - des Mines et Carrières (Dépôts), et aux Règlements - 1971 - des Mines et Carrières (Plans de mise en dépôt) (Royaume-Uni)
-

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1 — Depository in disused pit.
Fig. 2 — Valley site depository.
Fig. 3 — Off-valley depository.
Fig. 4. — Type A. Conventional embankment dam.
Fig. 5. — Type B. Staged conventional embankment.
Fig. 6. — Type C. Staged embankment with upstream impermeable zone.
Fig. 7. — Type D. Embankment with tailings impermeable zone.
Fig. 8. — Classification by hydrocyclone.
Fig. 9. — Type E₁. Embankment construction using downstream method.
Fig. 10. — Type E₂. Embankment construction using centreline method.
Fig. 11. — Type E₃. Embankment constructed with cyclones using upstream method.
Fig. 12. — Type F₁. Embankment construction using the “spigot” disposal method.
Fig. 13. — Type F₂. Embankment construction using the “sub-aerial” method.
Fig. 14. — Type F₃. Embankment construction using the “paddock” method.
Fig. 15. — Typical diversion systems.
Fig. 16. — Tower decanting system.
Fig. 17. — Chute decanting system.
Fig. 18. — Pump barge.
Fig. 19. — Particle size distribution curves for tailings.
Fig. 20. — Extended culvert decanting arrangement.
Fig. 21. — Automatic recording of seepage flows.
Fig. 22. — Dyke construction.
Fig. 23. — Dam of conditioned fly ash.
Fig. A.1. — Shear strength shown by Mohr’s diagram.
Fig. A.2. — Stability of tailings dams built by upstream method.
- Table 1. — Types and causes of defects and possibility of detection of potential failure by inspection and/or monitoring.
Table 2. — Possible remedial measures for slope instability problems.
Table 3. — Summary of seepage control measures to prevent or mitigate groundwater pollution.
Table 4. — Summary of inspection and reporting requirements for tips under Part I of the Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 (United Kingdom).
Table 5. — Principal requirements of contents of reports, plans, etc. under the Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 and the Mines and Quarries (Tipping Plans) Regulations 1971 (United Kingdom).
-

AVANT-PROPOS

Un certain nombre d'accidents dans le monde ont conduit à redoubler d'attention sur la nécessité d'une bonne gestion des stériles. La Commission Internationale des Grands Barrages et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement se sont associés pour éditer le présent Bulletin consacré aux problèmes de sécurité et d'environnement posés par les retenues de stockage des stériles. Le Bulletin est destiné aux maîtres d'ouvrage, exploitants et autorités de contrôle concernés par la mise en dépôt de stériles. Il traite des problèmes généralement rencontrés lors de la mise en dépôt des stériles provenant de mines, carrières et autres industries, et indique des méthodes sûres de conception et d'exploitation des barrages et retenues de stériles.

La conception des barrages de stériles, dont la sécurité doit être garantie, est discutée en détail ; les techniques et procédures de contrôle à mettre en œuvre au cours de la longue période de construction des ouvrages sont décrites. Beaucoup de choses peuvent changer au cours de la période de construction ; c'est ainsi qu'on peut être amené à poursuivre la construction du barrage au-dessus de la hauteur initialement prévue au projet, par suite de l'excellent déroulement des opérations. Par contre, des incidents peuvent survenir ; aussi un chapitre est-il consacré aux mesures correctives destinées à maintenir la stabilité.

Le Bulletin examine également les problèmes rencontrés à la fin des opérations, lorsqu'il devient souhaitable de terminer la construction du barrage de stériles et qu'il est nécessaire de réhabiliter l'ouvrage et sa retenue de stockage afin d'assurer leur sécurité permanente et leur parfaite intégration dans l'environnement. Un chapitre final décrit des règlements gouvernementaux relatifs au contrôle des barrages de stériles dans certains pays.

Le Bulletin a été préparé par le Sous-Comité Britannique des Barrages de Stériles, présidé par le Dr. A.D.M. Penman et comprenant le Dr. David Brook, Mr. P.J. Forbes, Mr. P.L. Martin et Mr. C.D. Routh. Il a fait l'objet d'un examen au sein du Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels et du PNUE. D'intéressantes observations ont été également reçues de Comités Nationaux. Nous remercions vivement tous ceux qui ont participé à la mise au point définitive du Bulletin.

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

FOREWORD

Following a number of well-publicized incidents around the world, renewed attention has been focused on the need for correct management of tailings. The International Commission on Large Dams and the United Nations Environment Programme have joined to produce this new Bulletin that addresses both the safety and the environmental issues of tailings impoundments. The Bulletin is intended as a guide to mine owners and operators, as well as government agencies who are concerned with the disposal of tailings. It discusses common problems in the disposal of tailings at mines, quarries and other industries, and identifies safe methods of designing and operating dams and impoundments.

The design of safe tailings dams is discussed in detail and the control and operational procedures necessary during the protracted construction of tailings dams are described. Many things can change during the construction period, not least that of having to continue raising the dam above its initial design height due to the continuing success of the operation. Should things begin to go wrong, a Chapter is devoted to remedial works that can be carried out in order to maintain stability.

The problems encountered at the end of operations when it becomes desirable to end tailings dam construction and it is necessary to rehabilitate the dam and its impoundment to make it permanently safe and environmentally acceptable are discussed and a final Chapter describes some of the governmental regulations controlling tailings dams in some countries.

The Bulletin was prepared by the British Sub-Committee on Tailings Dams comprising Dr David Brook, Mr P.J.Forbes, Mr P.L.Martin, Mr C.D.Routh; Chaired by Dr Penman. It has been reviewed both by the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams and by UNEP. Valuable comments have also been received from the National Committees. We are grateful to everyone involved for the final form and content of this Bulletin.

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

PRÉFACE

Les ruptures du dépôt des stériles houillers d'Aberfan (Galles du Sud, Royaume-Uni), en 1966, et du barrage de stériles houillers de Buffalo Creek (Virginie Orientale, États-Unis), en 1972, chacune ayant causé la mort de plus de 100 personnes, ont attiré l'attention sur les risques présentés par les dépôts de stériles miniers, en particulier de stériles de consistance liquide ou semi-liquide. Des ruptures ultérieures de barrages de stériles à Bafokeng (1974), Dorowa (1981), Stava (1985) et Merriesptuit (1994) ont montré que ces risques persistaient.

La prise de conscience de ces risques et la nécessité d'améliorer la conception et la construction des ouvrages de stockage de stériles ont conduit la CIGB à créer, en 1976, le Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels ; deux Bulletins ont été publiés : Bulletin n° 45 « Manuel des Barrages et Dépôts des Stériles » (1982), Bulletin n° 74 « Sécurité des Barrages de Stériles - Recommandations » (1989). Les productions minières et autres productions comportant des résidus continuant d'augmenter, ainsi que les problèmes de mise en dépôt des résidus, le Comité Technique sus-nommé a décidé de publier le présent Bulletin destiné à remplacer le Bulletin n° 45 épuisé ; le nouveau document tient compte des progrès réalisés au cours de ces dernières années, dans la construction, l'exploitation et la réhabilitation des ouvrages de stockage de stériles.

Cette mise à jour a été réalisée en vue de faire connaître aux organismes et personnes concernés par les industries minières et autres, l'application des techniques de génie civil et de la géotechnique à la conception, à la construction et à l'utilisation des barrages de stériles, ainsi qu'à la réhabilitation de ces ouvrages après fermeture, afin que leur sécurité et leur bonne intégration dans l'environnement soient assurées. Le Bulletin s'adresse à un large public pour lequel des connaissances de base en matière de barrages de stériles sont indispensables : personnel des compagnies minières, à divers niveaux, autorités de contrôle des mines, ainsi que toutes personnes n'appartenant pas à l'industrie minière mais intéressées par le sujet. Ce guide n'a donc pas pour objet de décrire en détail les diverses techniques spéciales, mais d'expliquer leur application aux travaux de mise en dépôt des stériles. Il n'est pas conçu comme un manuel destiné aux études de projet. Il ne s'adresse pas non plus aux spécialistes de grande expérience et doit être considéré comme un document de référence à consulter avec d'autres publications de la CIGB et ouvrages cités dans les Références figurant à la fin du présent document. Ceux intéressés par une documentation complète sur ces divers sujets trouveront de nombreuses autres références dans le Bulletin n° 44a « Bibliographie-Barrages et dépôts de stériles miniers et industriels ».

Outre sa collaboration dans l'examen du texte du Bulletin, le PNUE a préparé le message d'introduction ci-après, concernant les problèmes d'environnement associés aux retenues de stockage de stériles.

PREFACE

The failures of the Aberfan coal waste dump in South Wales, UK, in 1966 and Buffalo Creek coal waste tailings dam in West Virginia, USA, in 1972, focused attention on the potential hazard created by mining waste disposal, particularly of liquid or semi-liquid wastes, as both these failures caused more than 100 deaths. Subsequent failures of tailings dams at Bafokeng (1974), Dorowa (1981), Stava (1985), and Merriespuit (1994), have demonstrated that this hazard still persists.

Recognition of the potential hazard and the need for better design and construction of tailings impoundments led to the formation in 1976 of the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams and the preparation of Bulletin No.45, "Manual on tailings dams and dumps" (1983) and Bulletin No.74, "Tailings dams safety - guidelines" (1989). Now, a decade later, with continued demand for mineral production and other products with tailings residues combined with ever increasing problems of waste disposal, the ICOLD Committee has decided to issue this Bulletin as a replacement for the now out of print Bulletin No 45, to take account of the improved experience gained in the construction, operation and rehabilitation of tailings impoundments.

This revision has thus been prepared to acquaint those concerned with mining and other industries with the application of civil and geotechnical engineering technologies to the design, construction and use of tailings dams and to the need for rehabilitation of closed dams in a safe and environmentally acceptable manner. It is aimed at a wide readership for whom a basic understanding of tailings dams is appropriate. The readership may include different levels of management in mines and mining companies and all those in regulatory authorities concerned with mining, as well as those outside the mining industry who have an interest in the subject. This guide does not attempt therefore to explain the details of the different specialisms but aims to explain their application to tailings disposal. It is not meant as a design handbook. Nor is it addressed to senior specialists but it is intended as a reference book and guide to be read in association with other ICOLD publications and various papers and textbooks, the details of which are given in the References to be found at the end of this Bulletin. Many other references on tailings dams are to be found in Bulletin No. 44a (1989) "Bibliography-Mine and Industrial Tailings Dams and Dumps", for those interested in further reading in this subject.

In addition to assisting in the review of the text of this Bulletin, UNEP has prepared the following introductory message concerning the environmental issues on tailings impoundments.

MESSAGE D'INTRODUCTION DU PNUE

Introduction

Aujourd'hui, un haut niveau de protection de l'environnement est exigé des sociétés minières dans leurs activités. Traditionnellement, l'examen des problèmes environnementaux a porté principalement sur le cycle de production, c'est-à-dire, les phases de reconnaissance et d'exploitation d'un gisement. Mais aujourd'hui, on est plus conscient des impacts des opérations annexes, et l'on demande de plus en plus que celles-ci soit gérées avec les mêmes soins que la production.

Les barrages et les retenues de stériles font partie de ces activités périphériques auxquelles une priorité très marquée n'a pas toujours été accordée. Cependant, un certain nombre d'incidents récents ont confirmé que ces ouvrages avaient parfois un impact très lourd sur le plan de l'environnement et de la sécurité, à tel point que la gestion des stériles constitue maintenant un des critères de jugement de l'efficacité des sociétés minières en matière de protection de l'environnement.

La bonne gestion des stériles (comme de tout autre déchet minier) n'est pas difficile, moyennant une technologie adaptée et une surveillance adéquate. Par contre, si l'organisation de cette gestion n'intervient qu'après coup, ou se trouve confiée accessoirement à un personnel de chantier peu expérimenté, on risque de se trouver confronté à une situation dangereuse pour les populations et l'environnement.

De plus en plus, les organismes chargés de la protection de l'environnement relèvent les différents impacts des barrages de stériles. Heureusement, les accidents mortels sont rares. Mais on ne peut se contenter de cette situation. Les mines (et leurs retenues de stériles) deviennent plus importantes et produisent fréquemment des matières dangereuses (effluents toxiques,...). Pour celles implantées en zone d'accès difficile et à relief accidenté, le choix de l'emplacement du barrage de stériles est très limité avec, pour résultat, la réalisation d'ouvrages plus vulnérables.

Présentation des problèmes principaux

Plusieurs cas récents de rupture de barrages de stériles ont eu des impacts sérieux sur les milieux terrestre et aquatique, avec parfois perte de vies humaines. Ces ruptures surviennent sur tous les continents, et même dans les sociétés dotées de grands moyens humains et matériels. La divulgation de ces événements conduit le public à penser que ces ouvrages sont dangereux.

Actuellement, des incidents, certes moins dramatiques, mais plus nombreux sont connus. Les sociétés d'exploitation sont maintenant amenées à réduire les impacts, tels que les percolations dans le sol, l'évacuation des effluents, la production de poussières et les nuisances pour la faune sauvage. Les responsables de l'étude et de l'exploitation des mines sont confrontés à un nouveau défi, celui de surveiller et de maîtriser de tels impacts. Par ailleurs, dans certains cas, les stériles sont simplement relâchés dans l'environnement, sans se préoccuper de leur stockage.

INTRODUCTORY MESSAGE FROM UNEP

Introduction

Mining companies are now expected to achieve a high environmental performance in their operations. Traditionally the greatest environmental scrutiny has been on the production cycle of the mine, that is exploration and exploitation of an orebody. Today, ancillary operations are also seen to have a high environmental impact, and increasingly are being required to be managed with the same care as the production side.

Tailings dams and tailings impoundments are part of this 'peripheral' activity that has not always received a high priority in the past. A number of recent incidents have nevertheless reconfirmed that the environmental and safety impact from such structures can be quite severe. So much so that tailings management is now becoming one of the criteria by which companies' environmental performance is judged.

Good tailings management, as indeed is the case for all aspects of mine waste management, is not difficult to achieve if sound technologies and satisfactory supervision is used. Conversely, tailings management as an afterthought, or as a part-time activity by inexperienced site personnel, can result in situations that may endanger human lives and the environment.

Various ecological impacts of tailings impoundments are being increasingly remarked upon by environmental agencies. Serious accidents that result in loss of life are fortunately less frequent. There is no room for complacency, however. Mines, and their tailings impoundments, are becoming bigger, and frequently involve toxic effluents and other potentially hazardous materials. Where mines are located in remote areas with difficult terrain, options for tailings dams may be severely constrained, which can result in more vulnerable structures being built.

Overview of the key issues

Recent failures of tailings impoundments have led to serious impacts upon terrestrial and aquatic environments, and occasionally to loss of life. Major failures have been reported in all continents, including at sites run by companies with considerable professional and material resources. The publicity surrounding these events has sometimes led to a public view that such structures are inherently unsafe.

Less dramatic but more widespread incidents are now also being identified. Groundwater seepage, discharge of effluents, dust generation and interference with wildlife are common impacts that companies are now expected to mitigate. Monitoring and managing such effects places new challenges on mine designers and operators. Of course there are also situations where tailings are still being discharged into the environment without any attempt at retention whatsoever.

La destination finale des barrages et retenues de stériles préoccupe aussi les collectivités locales et les élus. Si ce problème a été moins étudié par les industriels que celui de la rupture, il importe cependant de cesser de léguer aux générations futures le lourd problème du traitement de nos déchets.

La mise en place de plans d'alerte et de secours en cas d'accidents va de pair avec la réduction des risques. Généralement, les barrages, dont un nombre toujours croissant de barrages de stériles, sont étudiés pour un niveau de risque donné (risque en cas de crue de période de retour donnée ou de séisme de projet). Par contre, on se préoccupe moins des mesures à prendre en cas de dépassement de ce seuil ou de défauts constatés a posteriori dans la méthodologie appliquée au projet. Qui a vu la notion de barrière secondaire intégrée dans le projet d'un barrage de stériles ? Combien de collectivités ont prévu des mesures d'action efficace en cas de rupture d'un ouvrage situé en amont ? (Et de même, combien d'industriels ont préparé - et expérimenté - des plans d'alerte et de secours en cas de rupture d'ouvrages de stockage des stériles ?).

La notion de risque est à placer dans le contexte du nombre d'ouvrages concernés. Un niveau de risque, généralement admis comme faible pour un barrage unique, peut correspondre à une probabilité globale d'accident excessive pour un pays ayant plusieurs centaines de tels ouvrages en exploitation.

La rupture d'un barrage est parfois mis sur le compte d'un séisme, d'un typhon, ou d'une pluie intense. Mais il serait plus juste de dire que l'ouvrage est incapable de résister aux sollicitations naturelles de la région, par suite d'un défaut de conception ou d'entretien.

Pour un site donné, on fait confiance à ceux chargés de l'étude et de la réalisation. Mais, lorsque l'administration recense un très grand nombre de barrages de stériles dans sa région, elle est peut-être en droit de se demander s'ils sont tous construits selon les mêmes normes éprouvées. Sinon, quels ouvrages sont douteux ? En effet, comment avoir confiance dans un ouvrage construit sur un site lointain, hors de la surveillance attentive de l'inspecteur ? Le problème de l'assurance qualité se pose de plus en plus pour des ouvrages toujours plus importants et qui, en cas de rupture, ont des conséquences nuisibles sur l'environnement et présentent des risques pour la vie humaine. D'autres secteurs industriels ont de plus en plus recours à des normes de qualité, telles que ISO 9000, etc. Quand une exploitation minière, avec accréditation ISO, appliquera-t-elle des normes formelles de qualité à la réalisation de ses barrages de stériles ? Avec une campagne d'information publique concernant les travaux de construction correspondants ?

Ces questions ne sont pas futuristes. Elles sont déjà entrées dans les mœurs dans les autres industries. Elles se concrétiseront au cours de la vie de nombreuses exploitations minières existantes. L'adaptation d'ouvrages existants conformément aux normes de qualité les plus récentes coûte bien plus cher que la réalisation d'ouvrages nouveaux selon ces normes. De plus en plus, une conception qui tient compte des contraintes de l'environnement doit intégrer une certaine souplesse, permettant l'adaptation aux normes actuelles et à venir.

Il ne s'agit pas uniquement des normes imposées par les règlements. On demande maintenant que les sociétés mettent en œuvre leurs propres normes, et

After-use of tailings structures is also becoming a more important issue for local communities and the regulators. Industry has given less attention to this issue than that of dramatic failure, and yet it is of vital interest to our shrinking world that we cease to hand over to future generations the costly responsibility of cleaning up our affairs.

Emergency preparedness goes hand in hand with risk reduction. Most dams, and increasingly so also tailings dams, are designed to a particular risk standard such as a one in so many years flood or earthquake. However, little thought is given to what measures should be put in place to prepare for the day when this risk criterion is exceeded, or if the design philosophy is later found to have some flaws. Where do we see secondary containment built into the concept of tailings retention? How many communities have been prepared to be able to act in an effective manner in case a structure upstream of their living space should fail? (How many companies for that matter have prepared and rehearsed emergency plans for a hypothetical failure of their tailings structures?).

The concept of design risk itself has to be seen in the context of how many structures are involved. A commonly agreed low risk level for a single dam may still result in unacceptably high aggregate probability of an accident in a country with several hundred units in operation.

There is also sometimes a claim that a dam failure was caused by an earthquake or a typhoon, or heavy rain. It would however be more accurate to say that the structure was unable to cope with the natural forces of the region, either because the design or the maintenance were deficient.

On any particular site we expect to have confidence in our designers and builders. However when the authorities are confronted with a large number of tailings dams in their domain, they perhaps are entitled to ask if all have been built to the same high standards. If not, which ones are suspect? How in fact do we have confidence in a structure that has been built in a remote place away from the scrutinizing gaze of an inspector? Questions of quality assurance are becoming ever more relevant for structures that are becoming larger, and that, if they should fail, result in environmental damage, and perhaps loss of life. Other industrial operations are increasingly taking recourse to quality standards such as ISO 9000 or equivalent. When will we see it as normal for an ISO accredited mine to apply formal quality standards to tailings dam construction? Including maintaining public records relating to the construction?

The above questions are not futuristic. They are already fact of life in other industrial sectors. They will become a reality within the lifetime of many existing mines. Retrofitting existing tailings structures to meet new quality standards is considerably more expensive than to design to the new standards in the first place. Increasingly environmental design should incorporate flexibility to allow future as well as existing standards to be met.

Standards are not only those set by government. Companies are now expected to, and often do, have high standards of their own. And for good reason. A small

beaucoup d'entre elles agissent déjà dans ce sens. Et elles ont raison. En effet, une petite fuite de cyanure s'échappant d'un barrage de stériles risque d'être aussi désastreuse pour le bilan de la société que la chute du cours des métaux. On a vu des exploitations minières fermées pendant de longs mois en attendant les résultats d'une enquête interminable et conduisant à une réglementation encore plus stricte. Les conclusions peuvent imposer des modifications très coûteuses, dans le seul but de rassurer un public peu convaincu que sa protection est maintenant, après l'événement, convenablement assurée. On comprend que ce même public, faute de connaissances suffisantes dans le domaine de la chimie industrielle et des calculs complexes de risque, soit inquiet de vivre sous la menace d'un grand barrage ou du risque d'empoisonnement par les cyanures polluant l'eau destinée à l'alimentation.

Quels sont les impacts sur l'environnement ?

Traditionnellement, en matière de protection de l'environnement, l'attention des industriels s'est fixée sur les risques humains dus à la rupture des barrages de stockage. De tels incidents se sont en effet produits, en faisant parfois de nombreux morts. La cause en est parfois un projet ou un choix d'implantation inadéquat, parfois l'effet d'un phénomène naturel (crue, séisme). On peut objecter que les personnes atteintes ou le barrage n'auraient pas dû se trouver là. En tout état de cause, il y aura toujours un risque lorsque des populations se trouvent à proximité d'un barrage.

Selon une définition plus large du risque, tenant compte des problèmes environnementaux, on peut noter que les retenues de stockage de stériles présentent d'autres impacts nuisibles. On peut citer :

- la retenue risque de porter atteinte aux biotopes et aux écosystèmes se trouvant à proximité,
- les lâchures, programmées ou accidentelles, risquent de polluer les eaux de surface,
- en cas de lâchure d'eaux de drainage acides, la pollution des eaux qui en résulte peut durer très longtemps,
- les infiltrations d'effluents (cyanure, éléments radioactifs) dans la fondation de l'ouvrage risquent de polluer les nappes phréatiques,
- les infiltrations peuvent provoquer une montée localisée de la nappe, ce qui pose des problèmes liés à la salinité des sols des zones à proximité (terres agricoles, biotopes),
- après séchage, les stériles, transformés en poussières, risquent d'être entraînés par des vents forts vers les habitations ou écosystèmes à proximité. Outre la nuisance qui en résulte, ces poussières peuvent contenir des matières toxiques provenant des stériles,
- dans le cas de certaines mines d'or, les effluents stockés par le barrage peuvent générer des gaz toxiques (cyanure,...) capables d'empoisonner les oiseaux attirés par le plan d'eau dans les régions semi-arides,
- la faune risque d'être piégée ou noyée dans certains ouvrages annexes mal conçus ou mal protégés (puits de contrôle, chenaux de mesure, etc.).

spill of cyanide effluent from a tailings dam can do as much damage to a corporate balance sheet as a fall in metal prices. Mines have been shut down for months on end while official enquiries into a tailings spill take their long course to stronger regulations. The recommendations may require costly changes for no other reason than to reassure a skeptical public that its welfare is now, after the event, finally being adequately safeguarded. In the absence of adequate knowledge and understanding of the hazards of industrial chemicals and the intricacies of risk calculations, the same public is understandably apprehensive about living in the shadow of a major dam, or being poisoned by cyanide in drinking water.

What are the environmental impacts?

Traditionally, environmental attention by companies has focussed on human risks associated with structural failures in dams and impoundments. There have indeed been a number of such incidents, some with heavy loss of life. Some have been due to poor design or location, some were incidents triggered by natural phenomena such as floods or earthquakes. It could be argued that either people should not have been where they were, or the dam should not have been there. Either way, the risk remains if we have dams and people close together.

With a broader conception of environmental risk that includes ecological values, we can note that tailings impoundments also cause other damaging impacts. These include:

- the impoundment may damage or destroy locally valuable habitats and ecosystems
- release of effluent, whether planned or unplanned, from an impoundment may contaminate surface water;
- where generation and release of acid mine drainage (AMD) occurs, the water pollution effects may be quite long-lasting;
- seepage of effluent through the base of the structure may contaminate groundwater with cyanide, or radioactive components;
- seepage may result in substantial mounding of the natural groundwater table and provoke soil salinity problems in nearby agricultural land or natural habitats;

- dried tailings may be swept as dust by strong winds into neighbouring habitations or ecosystems. In addition to being a nuisance, the dust may contain toxic components from the tailings;

- effluent in tailings impoundments at some gold mines generate toxic gases such as cyanide that may poison birds attracted by water in dry regions;

- poorly designed and protected ancillary structures such as monitoring bores, flumes etc. may trap or drown wildlife;

- les modifications apportées au paysage par les grandes retenues de stériles sont parfois inacceptables dans les zones d'intérêt scientifique ou de grande beauté naturelle.

En cas d'absence de stockage, les stériles auront, bien sûr, un impact direct sur le milieu récepteur.

Étant rarement recensés dans les autorisations d'exploitation ou les rapports d'activité, ces impacts sont difficilement chiffrables. Selon une récente enquête mondiale sur les incidents survenus aux barrages de stériles, menée par le PNUE/Industrie et Environnement et le Département des Affaires Humanitaires (DAH) des Nations Unies, les problèmes ci-dessus ont été cités à différentes reprises en tant que sujets de préoccupation des organismes de surveillance, mais aucune action de réglementation n'a encore été entreprise.

Aujourd'hui, les techniques d'évaluation (études d'impacts, études des risques) permettent d'avoir une estimation assez précise de la possibilité de tels impacts pour un site donné. Les risques ayant été identifiés, les solutions ou les remèdes destinés à réduire les impacts peuvent être étudiés.

Dans l'application de ces solutions, l'ingénieur doit non seulement se conformer aux normes actuellement en vigueur, mais aussi songer à l'avenir. En effet, les contraintes d'environnement, ainsi que les exigences techniques, évoluent rapidement. On peut supposer que les performances demandées à un ouvrage, actuellement en chantier, deviendront plus strictes avant la fin de la vie utile de celui-ci.

Un des problèmes liés à la gestion des stériles est celui du lessivage en tas. Il s'agit d'une technique de plus en plus répandue qui, si elle est bien conçue, ne comporte pas de danger pour l'environnement ; mais il existe néanmoins un risque non négligeable en cas d'opérations mal maîtrisées ou mal protégées. En fin de lessivage, le tas devient un amas de déchets comme un autre, dont la réhabilitation ou l'élimination doit être étudiée, réalisée et surveillée, comme pour tout autre site de stockage des stériles.

Comment répondre aux problèmes posés ?

Lors de l'étude et de la gestion des retenues de stockage de stériles, il est essentiel de voir les choses à long terme, car souvent ces ouvrages existeront longtemps, bien plus longtemps que la mine elle-même, voire que la société d'exploitation.

Il s'agit de savoir, de façon claire, qui sera responsable de l'entretien et de la réparation de la retenue de stockage.

Bien sûr, en principe, aucune opération d'entretien ou de réparation ne devrait être nécessaire. De par sa conception, l'ouvrage doit être stable, robuste et sans risque, capable de résister aux intempéries et aux autres conditions locales. Plutôt que de concevoir un ouvrage à vie limitée, il s'agit d'aménager le paysage de façon permanente. Par contre, il faut un dispositif d'auscultation et d'inspection afin de confirmer que ce but est réellement atteint.

Dans le court terme, on doit concevoir et exploiter des ouvrages répondant à toutes les contraintes d'environnement et de sécurité citées ci-dessus. Nous savons faire cela raisonnablement bien : le défi consiste à s'assurer que les précautions prises lors du projet soient maintenues en phases de construction et d'exploitation.

- landscape changes by major tailings impoundments may be unacceptable in areas of scientific or scenic significance.

In the case where no impoundment is built, the direct discharge of tailings will of course have a direct impact on the receiving environment.

As they are rarely included in site permits or reporting schedules, the true extent of these impacts is difficult to quantify. A recent survey by UNEP and the UN Department of Humanitarian Affairs (DHA) of tailings dam incidents in countries around the world found that most of the above issues were quoted at some stage as being of concern to regulatory bodies, even if action had not yet been taken.

Assessment techniques such as environmental impact assessment (EIA) and risk assessment can now give a reasonably good estimate of the possibility of such impacts occurring at a particular site. Once identified, risk-based design solutions or remedial measures can be utilized to avoid or minimize the impacts.

In applying these solutions designers need to plan for the future as well as for compliance with current standards. Both the environmental agenda and technical standards are evolving rapidly. Performance expectations can be expected to change over the lifetime of many structures being built today.

One emerging issue that is related to tailings management is that of heap leaching. This practice is becoming more widespread, and although well engineered leach processes can be environmentally safe, there is substantial risk from poorly managed or protected operations. At the end of the leaching operation, the heap becomes another disposal/rehabilitation operation that must be planned, executed and monitored, like any other tailings site.

How should we respond to the issues?

In designing and managing tailings impoundments, it is essential that we take a long view, for in many cases the impoundment structures will be there for a long time. Much longer than the life of the mine, and longer even than the life of the company.

Taking a long view means being clear about who has responsibility for maintenance and repair.

Ideally of course no maintenance and repair should be needed. This means designing a structure that is intrinsically stable, self-repairing, and risk-free, and able to stand up to weather and other local influences. The concept is more to design a permanent landscape feature rather than a short-term utility. In all cases however a monitoring and verification procedure is needed to confirm that this goal has truly been achieved.

In the short term we have to design and operate structures that respond to all the immediate environmental and safety issues above. We know how to do this reasonably well; the challenge is to see that the design principles are carried over reliably into the construction and operational phases.

Un autre aspect important concerne les dispositions à prévoir en cas d'accident. Malgré tous les soins apportés à la conception et au projet, une rupture n'est pas impossible, même pour les barrages de stériles. Pour cette raison, il faut systématiquement appliquer la notion de protection de deuxième degré et de préparation de plans d'alerte et de secours. Cette notion d'établissement de plans d'alerte et de secours en cas d'accident est adoptée par les autres secteurs industriels, notamment grâce au programme APELL de Vigilance et Prévoyance en cas d'Accidents au Niveau Local du PNUE/IE.

Il est essentiel d'accorder la même attention à la gestion des stériles qu'aux autres aspects opérationnels des activités minières. On ne pourra atteindre un niveau d'efficacité toujours plus élevé que moyennant un niveau comparable d'étude, d'évaluation, de contrôle qualité, d'auscultation et de réexamen.

Dans ce but, il est nécessaire que tous les exploitants miniers soient conscients de leurs responsabilités de maître d'ouvrage, à l'instar des sociétés les plus performantes. Le rôle des associations minières, nationales et internationales, reste un élément crucial en ce sens.

En ce qui concerne les pouvoirs publics, il est nécessaire de porter une plus grande attention sur l'ensemble des effets environnementaux cités ci-dessus, susceptibles de se produire. Il convient de fixer un niveau acceptable de risque en relation avec le risque potentiel local, en tenant compte des ruptures connues dans le pays. Il faut adopter des recommandations bien étudiées pour les barrages de stériles, au niveau national, associées à une assurance qualité performante pour la réalisation des ouvrages.

Les industriels et les autorités doivent collaborer pour la mise en place d'un plan d'alerte et de secours pratique qui fait intervenir les pouvoirs publics et les collectivités locales selon le cas. La procédure APELL peut constituer un bon modèle pour de telles initiatives.

Relation avec le présent Bulletin

Une bonne gestion repose sur un projet bien étudié. Ce Bulletin est consacré, entre autres, à l'amélioration des projets, en présentant les critères de conception, les techniques d'étude et les éléments principaux dont il faut tenir compte lors de l'étude d'un barrage de stériles.

Certains chapitres traitent des étapes d'intégration des critères relatifs à la protection de l'environnement, et de la méthodologie correspondante. D'autres chapitres concernent la réhabilitation éventuellement nécessaire. Un chapitre est consacré à la réglementation actuelle qui évolue sans cesse.

Les recommandations sont basées sur les leçons tirées des expériences antérieures - réussites et erreurs -, conduisant à une codification plus poussée de la construction des barrages de stériles.

La situation continuera sans aucun doute à évoluer, des niveaux de sécurité plus élevés devenant possibles à moindre coût. Peut-être verra-t-on également apparaître d'autres critères liés à l'environnement. Pour l'instant, on peut souligner que les principes et les pratiques présentés dans ce Bulletin seront très utiles dans la recherche d'un comportement plus sûr pour les futurs barrages de stériles. Le PNUE est très honoré d'avoir pu collaborer à cet ouvrage et en espère une large diffusion.

There is also the aspect of emergency preparedness and planning. No matter how well we design and plan, failures do occur, even at tailings dams. The concept of secondary security measures, and emergency preparation need to become the rule, not the exception, in tailings dam management. Emergency preparedness concepts have been adopted by other industry sectors, as for example through the successful UNEP-led programme on Awareness and Preparedness for Emergencies at the Local Level (APELL).

A key factor for tailings management is that it should be given a comparable degree of attention as other operational parts of a mining operation. It is only when tailings are subject to the same planning, evaluation, quality control, monitoring and review procedures that consistently high performance will be achieved.

This requires a reinforced notion of owner responsibility on the part of all mine managers, not only a few good performing companies. Accordingly, the role of national and international mining associations remains a vital element.

For the authorities, greater attention to assessing the potential impact of all the environmental effects outlined above is necessary. A level of acceptable risk needs to be set commensurate with the local hazard potential, taking into account the history of particular design failures in the country. Sound national guidelines for tailings dams should be adopted, with of course a high level of quality assurance of actual construction of dam structures.

Both the industry and the authorities should cooperate to set in place a practical emergency response plan that includes public authorities and local communities as appropriate. The APELL procedure can be useful model for such initiatives.

Relationship with this Bulletin

Good design is the basis of good management. This Bulletin is about good design. It outlines the design principles, the approaches and the key factors to be kept in mind when planning a tailings dam.

Some sections indicate where environmental criteria need to be incorporated into the design, and how this can be done. Others deal with rehabilitation and remediation, should this become necessary. A section outlines where we stand today in the constantly evolving regulatory system.

The recommendations are based on what we have learnt during the past years of trial and error, resulting also in a gradually increasing codification of tailings dam construction.

No doubt further evolution will occur, and higher levels of safety will become possible at lower cost. Perhaps, also, additional environmental criteria will come into play. For the moment, all we can say is that the principles and practices outlined in this Bulletin will go a long way to making tailings dams consistently perform more reliably than they do now. It has been a privilege for UNEP to become associated with this work, and we look forward to its widespread application.

1. INTRODUCTION

1.1. DÉFINITION DES STÉRILES

Les stériles sont les résidus constitués de particules fines, provenant du traitement de divers matériaux dans l'industrie. En majorité, ils proviennent du traitement de minerais en vue de l'extraction des matériaux ayant une valeur marchande. Leur granulométrie peut être une granulométrie naturelle, mais le plus souvent elle résulte du concassage et du broyage du minerai destinés à augmenter sa surface et à faciliter l'extraction du matériau souhaité. Celui-ci peut être récupéré par flottation ou par traitement chimique. Les résidus fins sont rejetés sous forme de boues n'ayant aucune valeur marchande - ces stériles doivent être évacués de l'usine de traitement, sans danger et aussi économiquement que possible. En général, la teneur en eau des boues est suffisamment élevée pour permettre leur évacuation par écoulement dans des canaux ou par pompage à travers des conduites. On peut ainsi transporter les boues sur de grandes distances jusqu'au site de dépôt. Bien entendu, on doit effectuer un bilan économique coût du site - coût du transport afin d'obtenir la solution de mise en dépôt la moins coûteuse.

1.2. PROVENANCE DES STÉRILES

La plus grande quantité des stériles provient des industries minières, métallifères et houillères, mais des quantités importantes peuvent également résulter d'opérations telles que :

- la combustion de charbon broyé (cendres volantes) ;
- la transformation de bauxite en alumine (boue rouge) ;
- le lavage de sables, de graviers ou de granulats de roche concassée, pour l'élimination des fines ;
- l'entretien de rivières, de ports, par dragage ;
- l'exploitation hydraulique de dépôts de kaolin.

Des matériaux comparables proviennent également d'autres traitements industriels, tels que :

- rejets de l'industrie chimique (par exemple, fraction insoluble de dépôts de potasse ou de sel) ;
- terres provenant du nettoyage de végétaux ;
- traitement des eaux usées domestiques et industrielles, en vue d'éliminer les polluants avant évacuation ou recyclage.

1. INTRODUCTION

1.1. WHAT ARE TAILINGS?

Tailings are the fine particle residues which arise from the processing of various materials in industry. By far the majority are produced by the processing of minerals to recover the economically valuable material. Their fine particle size may be the natural size of the waste fraction, but more commonly it is caused by crushing and grinding of ore rock to fine sizes so as to increase the surface area and assist in the process of extraction of the desired material. The resulting material of value may be removed by flotation or chemical processes and the remaining fine-grained materials rejected at the "tail end" of the process as a worthless slurry - these tailings have to be removed from the processing plant safely and as cheaply as is feasible. In general the water content of the slurry is high enough to enable the tailings to flow away from the plant along channels or to be pumped through pipelines. In this way they can be transported over considerable distances to sites suitable for their disposal. Clearly, the cost of the site and the cost of transportation have to be balanced to give the most economic solution to tailings disposal.

1.2. WHERE DO TAILINGS COME FROM?

Tailings arise predominantly in the metalliferous mining and coal industries but significant amounts may also arise from, for example:

- the burning of pulverised coal [pulverised fuel ash (pfa) or fly ash];
- the conversion of bauxite to alumina (red mud);
- washing out of fines from sands and gravels or crushed rock aggregates;
- waste product from maintenance dredging of rivers, ports and harbours;
- from hydraulic mining of china clay deposits.

Similar materials also arise from other industrial processes such as:

- waste from the chemical industry, like the insoluble fraction of potash or salt deposits;
- soil from cleaning vegetables;
- treatment of domestic sewage or industrial effluents to remove pollutants prior to discharge or recycling of clean water.

1.3. PROPRIÉTÉS DES STÉRILES

Les propriétés des stériles mis en dépôt dépendent de leur origine et de leur degré de compactage, mais on peut faire quelques commentaires généraux. Leur géochimie doit être examinée avec attention. La majorité des stériles est constituée de particules dont la granulométrie se limite essentiellement aux catégories : sable, silt et argile (c'est-à-dire, sable et boue). Les stériles se caractérisent généralement par :

- une forte teneur en eau ;
- une perméabilité faible à modérée ;
- une faible plasticité ;
- une résistance au cisaillement faible à modérée ;
- une compressibilité forte à modérée.

Beaucoup de stériles mis en dépôt présentent une tendance à se liquéfier sous l'effet de contraintes dynamiques résultant de séismes ou autres vibrations. Les propriétés chimiques dépendent :

- du minerai originel ;
- des altérations chimiques après mise en dépôt ;
- des résidus des réactifs utilisés dans le traitement.

Les stériles métallifères et houillers sont souvent acides, lors de leur mise en dépôt, ou après altération, et contiennent une proportion non récupérée du minerai initial. Le soulèvement de poussière par le vent ou l'évacuation d'eau contaminée peuvent provoquer de graves problèmes de pollution.

1.4. MÉTHODES DE DÉPÔT DES STÉRILES

Du fait de leur valeur économique faible ou nulle, les stériles doivent être considérés comme des déchets à évacuer. Cette évacuation doit présenter toute sécurité, respecter l'environnement, et être aussi économique que possible. Plusieurs méthodes existent :

- utilisation économique ;
- décharge dans les rivières ou la mer ;
- mise en dépôt en souterrain ;
- décharge extérieure à sec ;
- ouvrages de stockage des stériles.

1.5. DÉFINITION DES BARRAGES DE STÉRILES

Le stockage des stériles au moyen de barrages est la méthode la plus courante de mise en décharge des stériles, le barrage étant généralement constitué de résidus de broyage, de déchets miniers, de terre ou d'enrochement. Le but est de rete-

1.3. WHAT ARE THE PROPERTIES OF TAILINGS?

The properties of deposited tailings vary depending on their source and degree of compaction, but some general comments can be made. Attention should be paid to their geo-chemistry. The majority are a particulate material and the definitive physical property is a particle size range restricted predominantly to the sand, silt and clay categories (i.e. sand and slimes). Tailings are generally characterised by:

- a high water content;
- low to moderate permeability;
- low plasticity;
- low to moderate shear strength; and
- high to moderate compressibility.

Many stored tailings exhibit a tendency to liquefy under dynamic stress imposed by earthquake or other vibrations. The chemical properties depend on:

- the original mineral deposit;
- chemical alterations due to weathering after deposition;
- residual reagents used in processing.

Metalliferous and coal tailings are often acid, either at discharge or after weathering, and contain an unrecovered proportion of the original mineral content. Dust blow or discharge of contaminated water may therefore give rise to serious pollution problems.

1.4. HOW ARE TAILINGS DISPOSED?

Because they have little or no economic value, tailings have to be disposed of as wastes. The objective of tailings disposal is to dispose of the tailings safely and in an environmentally acceptable manner as economically as possible. A number of methods are available, including:

- economic utilisation;
- discharge to rivers or the sea;
- underground disposal;
- dry disposal to land; and
- tailings impoundment structures.

1.5. WHAT ARE TAILINGS DAMS?

Tailings impoundments retained by tailings dams are the most common form of tailings disposal and generally the dam is constructed of mill tailings, mine waste or earth or rock fill. The objective is to retain the slurry and allow the tai-

nir les boues et de permettre aux stériles de se déposer, ce qui rend possibles l'évacuation ou la récupération (recyclage) de l'eau des boues, ainsi que le stockage permanent (ou dépôt à sec) et la restauration éventuelle du dépôt. Les stériles peuvent également être mis en dépôt sur le sol après élimination de l'eau (par exemple, au moyen de presses filtrantes), ou par voie hydraulique dans des ouvrages qui ne retiennent qu'un faible volume d'eau.

La conception des barrages et des dépôts de stériles a été souvent empirique et leur comportement a été parfois peu satisfaisant. Le but final de tout dépôt de stériles est que celui-ci ne nécessite aucune intervention pour assurer sa stabilité et qu'il puisse être réhabilité pour une mise en valeur ultérieure des terres et une couverture végétale. Il faut se rappeler cet objectif à toutes les étapes du projet et pendant la longue période de construction.

Les barrages de stériles et les barrages à retenue d'eau ont un certain nombre de caractéristiques communes, mais présentent des différences quant à leur exploitation, aux techniques de construction et aux caractéristiques des matériaux des barrages et des stériles stockés. En particulier :

- les barrages de stériles sont conçus pour être abandonnés sans autre exploitation ;
- leur construction a généralement lieu en même temps que leur exploitation ;
- le plus souvent, ils ne retiennent pas d'eau si ce n'est à des fins de sédimentation, de récupération et de traitement par broyage ;
- en général, la retenue d'eau ne résulte que du mode opératoire visant à la mise en dépôt de résidus solides ; toutefois, dans quelques schémas « en circuit fermé » où aucune évacuation d'eau à l'aval n'est permise pour des raisons environnementales, un certain stockage d'eau peut être nécessaire.

1.6. IMPORTANCE DES STÉRILES ET DES BARRAGES DE STÉRILES

Les stériles constituent l'un des matériaux de construction de barrages les plus abondants dans le monde. Le volume ou le tonnage de résidus miniers traité chaque année dans le monde dépasse celui de toute autre industrie.

L'échelle du problème de la mise en dépôt des stériles peut facilement être estimée à partir de quelques données. En 1986, la production mondiale de charbon était évaluée à 4 545 000 000 tonnes, celle de minerais de fer à 916 000 000 tonnes, et celle de minerais de cuivre, de plomb et de zinc à 18 500 000 tonnes (teneur en métal). Depuis 1940, l'introduction de machines d'extraction en continu dans l'industrie minière, ainsi que l'exploitation de filons minces de charbon associés à du schiste argileux ou à du grès, ont contribué à augmenter la quantité des résidus miniers apportés en surface et ont nécessité l'implantation de stations de lavage du charbon sur le site de la mine. Au cours de la même période, le nombre de centrales thermiques au charbon a augmenté et il y a eu un besoin énorme de sites de stockage pour les résidus de lavage du charbon et les cendres volantes. Dans l'industrie minière de métaux non ferreux, on peut maintenant exploiter économiquement des minerais moins riches qu'auparavant (par exemple,

lings to settle, thus enabling discharge or reclamation (recycling) of the slurry water and permanent retention (or dry disposal) and eventual restoration of the tailings. Tailings may also be disposed to land in dumps after dewatering (eg. by filter pressing) or as hydraulic fill in structures which do not impound significant quantities of water.

Both tailings dams and tailings dumps have often been designed by empirical means and their performance has sometimes been less than satisfactory. The ultimate aim of any tailings disposal scheme is that the tailings can safely be left in a condition that will require no maintenance to ensure their stability and thus are restored to a suitable subsequent land use and vegetation cover. This final objective has to be borne in mind at all stages of design and throughout the prolonged construction.

Tailings dams have a number of features in common with water retention dams but their operational needs are different, as are many of the construction techniques and material characteristics of the dams themselves and the tailings retained behind the dams. In particular:

- tailings dams are designed to be abandoned and not operated;
- construction is usually simultaneous with their operation;
- they do not usually impound water for purposes other than sedimentation, reclamation and mill operation; and
- in general, water retention is only incidental to their operation for the ultimate purpose of solid waste disposal, although in some 'closed circuit' schemes, where no discharge of water downstream is permitted for environmental reasons, some water storage may be required.

1.6. HOW EXTENSIVE ARE TAILINGS AND TAILINGS DAMS?

Tailings are one of the most abundant dam-building materials in the world. The volume or tonnage of mine wastes handled throughout the world each year exceeds that of any other industry in the world, including non-mine construction.

The scale of the tailings disposal problem can readily be envisaged from a few examples. In 1986, world production of coal was estimated at 4 545 000 000 tonnes, that of iron ore at 916 000 000 tonnes, and of copper, lead and zinc at 18 500 000 tonnes (metal content). Since the late 1940s, continuous mining machinery has been introduced in the coal mining industry and the mining of thin layers of coal with shale or sandstone partings has increased the total amount of waste brought to the surface and has introduced the need for coal washing plants at the mine site. During the same period, coal fired power generation has increased and the need for impoundments for disposal of coal washery tailings and pulverised fuel ash has grown tremendously. In non-ferrous metal mining, the quality of metal ore which can be economically extracted has generally been lowered considerably, e.g. from 3-4% copper in the 1900s to 0.2-0.3% today, with a corresponding increase in the amount of waste produced. It is likely that overall mine waste

pour le minerai de cuivre, teneur en métal de 3-4 % dans les années 1900, 0,2-0,3 % aujourd'hui, ce qui conduit à une augmentation de la quantité de résidus. Il est probable qu'actuellement la production globale de stériles miniers équivaut à peu près à la production totale minière de charbon et de minerais industriels, et doit dépasser 5 000 000 000 tonnes par an. Une seule exploitation minière peut produire plus de 150 000 tonnes par jour. La mise en dépôt des stériles est donc une activité considérable.

Les barrages de stériles peuvent être des ouvrages de grandes dimensions entraînant d'importants travaux d'ingénierie ; certains figurent parmi les plus grands barrages du monde. Le Registre Mondial des Barrages de Stériles Miniers et Industriels recense 8 barrages de stériles de plus de 150 m de hauteur, 22 de plus de 100 m et 115 de plus de 50 m. Il faut y ajouter 6 retenues de stockage dont la surface a plus de 100 km² et dont le volume dépasse 50 hm³. Malheureusement, ce Registre est loin d'être complet et la situation réelle n'est pas connue.

1.7. CONTENU DU GUIDE

Après le chapitre 1 constituant une introduction, le guide comprend les chapitres suivants : chapitre 2 : techniques de mise en dépôt des stériles ; chapitre 3 : conception des barrages de stériles ; chapitre 4 : contrôle des travaux et exploitation ; chapitre 5 : mesures correctives éventuelles ; chapitre 6 : réhabilitation et fermeture ; chapitre 7 : aspects réglementaires (entre autres, exemple du Royaume-Uni).

production, including tailings, is about equivalent to the total mined production of coal and industrial minerals and almost certainly exceeds 5 000 000 000 tonnes per annum. One mining operation can produce in excess of 150 000 tons/day. Tailings disposal is, therefore, a massive operation.

Tailings dams can be large and significant engineering works, some of which are amongst the world's major dams. The "World Register of mine and industrial tailings dams" lists 8 tailings dams higher than 150 m, 22 higher than 100 m and 115 higher than 50 m. In addition, 6 impoundments have a surface area greater than 100 km² and a storage volume exceeding 50x10⁶ m³. Unfortunately this World Register is far from complete and the true scale of operations is not known.

1.7. HOW TO USE THIS GUIDE.

Following an introduction to tailings disposal systems in Chapter 2, Chapter 3 deals with design of tailings dams and Chapter 4 with construction control and operation. Chapter 5 deals with remedial works which may be necessary and Chapter 6 looks at rehabilitation and closure. Finally, Chapter 7 examines regulatory aspects of tailings disposal, using the example of the United Kingdom in particular.

2. TECHNIQUES DE MISE EN DÉPÔT DES STÉRILES

2.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

Au cours des siècles écoulés, les stériles provenant des exploitations minières et industrielles étaient en général déversés dans le cours d'eau le plus proche, et étaient transportés par l'eau pour se déposer plus à l'aval ou même dans la mer - en tout cas, en dehors de la zone d'exploitation des installations. Mais maintenant, il est rare que les stériles soient suffisamment neutres, les effets physiques sur le milieu ou sur les activités humaines, le long des rives, suffisamment faibles, et le contrôle réglementaire suffisamment laxiste, pour permettre une telle mise en dépôt économique.

Ultérieurement, une modification de la méthode de mise en dépôt sans confinement consista à remplacer le cours d'eau par une conduite acheminant jusqu'au rivage - et, généralement, au-delà, jusqu'aux eaux profondes - les stériles devant être déchargés dans la mer. Les particules grossières se déposaient normalement près du point de décharge et les particules fines étaient dispersées plus ou moins, suivant leurs propriétés coagulantes, par les marées et les courants. L'effet toxique immédiat et les dégâts à long terme causés au fond de la mer étant préoccupants, cette solution est également devenue inacceptable sauf en de rares circonstances.

Pour la grande majorité des exploitations minières et industrielles, la mise en dépôt des stériles doit se faire sur le sol. Cela entraîne le choix d'une zone de terrain où les stériles seront stockés pendant la longue période d'exploitation de l'usine et, à moins qu'ils ne soient récupérés pour un autre traitement, pendant une période ultérieure indéterminée. Le dépôt doit présenter une grande sécurité vis-à-vis des dégâts résultant d'écoulements d'eau, et ne pas polluer la zone environnante, les cours d'eau voisins, la nappe phréatique et l'atmosphère.

Les stériles étant transportés sous forme de boue depuis l'usine et pouvant rester ou redevenir fluides, la masse déposée nécessite un confinement approprié pour empêcher que les matériaux ne s'écoulent en dehors de la zone prévue. La mise en dépôt peut souvent être considérée comme un stockage se décomposant en deux parties principales : un remblai de retenue (le barrage de stériles) et un réservoir de stockage des stériles. Dans la plupart des réservoirs de stockage, les solides qui sont en suspension se déposent dans la zone de décharge, celle-ci étant donc constituée de matériaux solides, de consistance variable, et d'un fluide en surface - généralement de l'eau - auquel peuvent s'ajouter des eaux de ruissellement naturel ou de précipitations directes, formant un lac. Le fluide peut être renvoyé à l'usine de traitement pour réutilisation, stocké dans la retenue pour utilisation ultérieure ou pour élimination par évaporation, ou bien, s'il est suffisamment inoffensif, évacué dans les cours d'eau avoisinants.

2. TAILINGS DISPOSAL SYSTEMS

2.1. GENERAL CONCEPTS

In past centuries the tailings from mining and industrial operations were generally discharged into the nearest water course and were carried by the water to be deposited further downstream or out to sea at least out of the way of the plant operations. Only rarely now is the tailings product sufficiently innocuous, the physical effect on the shore line sufficiently harmless to the environment or to human activity and the statutory control sufficiently lax for such a cheap method of disposal to be possible.

A later development of the unconfined method of disposal was the replacement of the water course by a pipeline leading to the shore and usually beyond to deeper waters for the tailings to be discharged freely out to sea. The coarser particles normally settled near the discharge point and the finer particles were dispersed to a greater or lesser extent, according to their coagulating properties, by the tides and currents. Widespread concern over the immediate toxic effect and the long term damage to the sea bed, has led to this solution being similarly unacceptable except in rare circumstances.

For the vast majority of mining and industrial enterprises disposal must be effected on land. This will entail the selection of a tract of land on which the tailings will be stored for an extended period while the waste is being generated by the plant and, unless reclaimed for further treatment, for an indefinite period thereafter. The deposit must be secure against physical damage from outflow and must not pollute the surrounding area, neighbouring water courses, the groundwater nor the atmosphere.

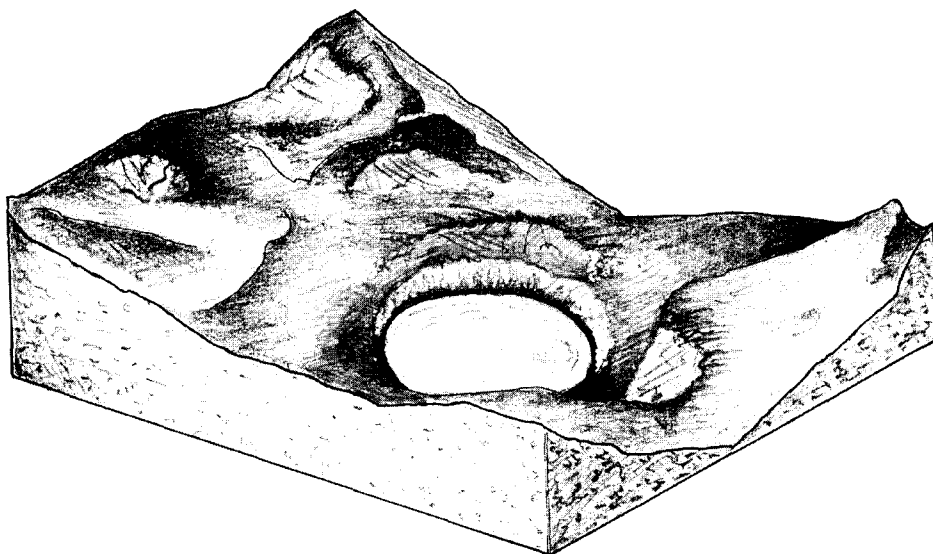
Since the tailings are conveyed as a slurry from the plant and may remain as a fluid, or be capable of reverting to a fluid, the deposited mass requires confinement to the extent necessary to prevent the flow of the material out of the designated area. The depository is consequently often described as an impoundment and its arrangement may be subdivided into two principal components a confining embankment (the tailings dam) and the impoundment of the deposited material. In most impoundments the solids settle out of suspension on discharge and it will thus be composed of settled solids of variable consistency and a supernatant fluid usually water which may be supplemented by natural runoff or direct precipitation forming a pond. The supernatant fluid may be returned to the processing plant for reuse, stored in the impoundment for future use or for removal by evaporation, or, if sufficiently innocuous, discharged into the neighbouring water courses.

Il existe une grande variété de dispositions répondant à ces critères de base. Le choix du site et du type de dépôt tiendra compte de divers facteurs : sécurité, coût, topographie, climat, sismicité, effets sur l'environnement et facilité d'exploitation.

En ce qui concerne le remblai de retenue et le réservoir de stockage, les dispositions principales peuvent se classer comme suit :

A. Excavation existante

Une excavation à ciel ouvert ou en souterrain désaffectée, une carrière, une zone de sol effondrée au-dessus d'une exploitation minière ou une cuvette naturelle peuvent exister. Le principal avantage d'un tel site est que le confinement des matériaux déposés dépend en grande partie ou entièrement du sol existant, la mise en décharge étant peu coûteuse (Fig. 1). On devra protéger la zone environnante contre les inondations. Par contre, il y a des inconvénients. Le stockage d'un matériau fluide peut affecter la sécurité de l'exploitation minière contiguë, du fait de l'augmentation des pressions interstitielles, d'infiltrations ou du risque de rupture due à des résidus liquéfiés avec inondation des installations de la mine (comme cela s'est produit, en 1970, à la mine de Mufulira, en Zambie). Il y a également un risque de pollution de la nappe phréatique dans le cas d'un dépôt sous le niveau du terrain naturel, si l'interface n'est pas étanche.



B. Site dans une vallée

Une topographie vallonnée ou de pente raide peut conduire au choix d'un site en travers de vallée. Cela entraînera la construction d'un remblai de retenue à l'aval (ou, dans certains cas, à l'aval et à l'amont) de la zone de dépôt (Fig. 2). La

A wide variety of arrangements fulfilling these basic requirements is available. The choice of site and arrangement type will be affected by considerations of safety, economy, prevailing topographical, climatological and seismic factors, environmental effect and operational convenience.

The basic arrangements of storage facilities, with respect to the impoundment and confining embankment, may be classified as:

A. Existing pit

A disused open cast or underground working, quarry, subsided ground above mine workings or a natural pan may be available. The obvious principal advantage of such a site is that the confinement of the deposited material will be effected largely or entirely by the existing ground, making for cheap disposal (Fig.1). Safety against inundation of the surrounding area will normally be well assured. Disadvantages may include the effect on the security of adjacent mine workings caused by the introduction of a fluid material into the impoundment, with consequential increase in pore pressure, seepage or the risk of liquefied tailings breaking through and inundating the workings (as occurred in 1970 at the Mufulira copper mine in Zambia). Severe groundwater pollution may also result from the introduction of tailings into a zone penetrating below the ground surface if the interface is not sealed.

Fig. 1

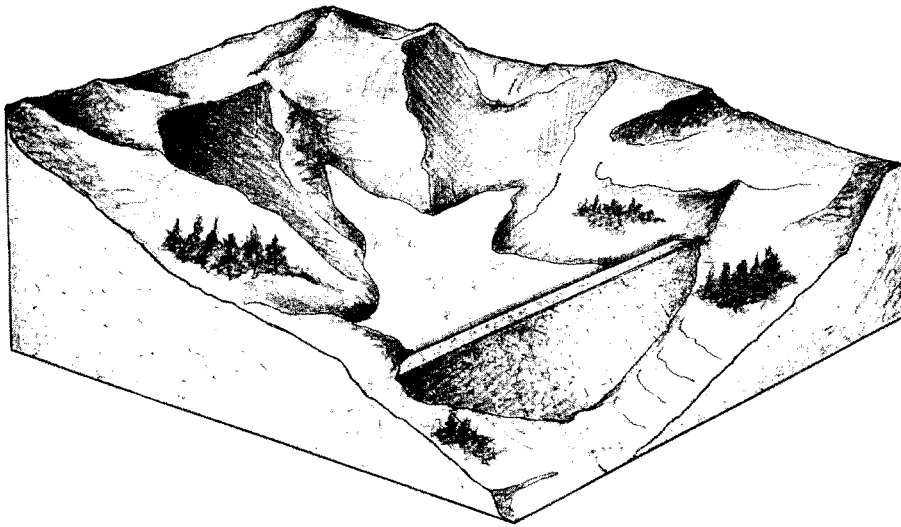
Depository in disused pit

Dépôt dans une excavation désaffectée

B. Valley site

An undulating or steeply sloping topography may lead to the selection of a site straddling a valley. This will entail the provision of a confining embankment on the downstream side (or in some cases, on both the upstream and downstream

plus grande valeur du rapport volume de stockage/volume du remblai de retenue, constituant un indice économique, sera en général obtenue pour un site de vallée. Toutefois, la hauteur du remblai aval est généralement plus grande que celle requise dans d'autres solutions et une attention spéciale doit être portée à la stabilité du remblai. Une telle solution « en vallée » entrave l'écoulement naturel du cours d'eau et il sera donc nécessaire de prévoir des aménagements appropriés : l'écoulement total provenant du bassin versant amont sera dérivé à travers ou à côté de la zone de dépôt, ou sera admis dans le fluide de décantation. Des ouvrages importants d'évacuation des crues peuvent être nécessaires.



C. Site en dehors d'une vallée

Un site sur un sol plat ou de faible pente, ou sur un versant de pente douce d'une vallée, peut constituer la seule solution disponible ou la solution préférée. Une telle zone de stockage nécessitera la construction de digues de retenue en remblai sur toute la périphérie ou sur les versants (Fig. 3). Le rapport volume de stockage/volume de l'endiguement peut être faible, ce qui traduit un site moins économique. Les avantages de cette solution sont : volume d'écoulement naturel à contrôler généralement faible, en particulier pour une retenue de stockage constituée par un endiguement périphérique ; probabilité que la pollution de la nappe phréatique sera plus facilement maîtrisée que dans le cas d'une zone de stockage pénétrant sous le niveau du terrain naturel ou située dans une vallée.

En pratique, une zone de stockage peut se rattacher à plusieurs catégories ; par exemple, un site en dehors d'une vallée peut contenir des vallons, une excavation existante peut nécessiter des remblais d'endiguement dans les dernières étapes de mise en dépôt, etc. Deux barrages peuvent être utilisés dans une vallée, avec une galerie pour acheminer les eaux de la rivière au-delà de la zone de stockage. Le classement des sites sert principalement à souligner l'influence des diverses conditions topographiques.

sides) of the depository (Fig.2). The greatest ratio of storage volume to confining embankment volume, an indicator of economy, can normally be obtained in a valley site. The downstream confining embankment height, however, is normally greater than that required for other arrangements and particular attention to embankment stability may be needed. The use of a valley site interferes with the natural stream flow and it is thus necessary for the facility to be structured to manage the entire runoff from the catchment upstream by diversion through or around the depository or by acceptance within the reservoir and dissipation with the supernatant fluid. Substantial spillway facilities could be required.

Fig. 2

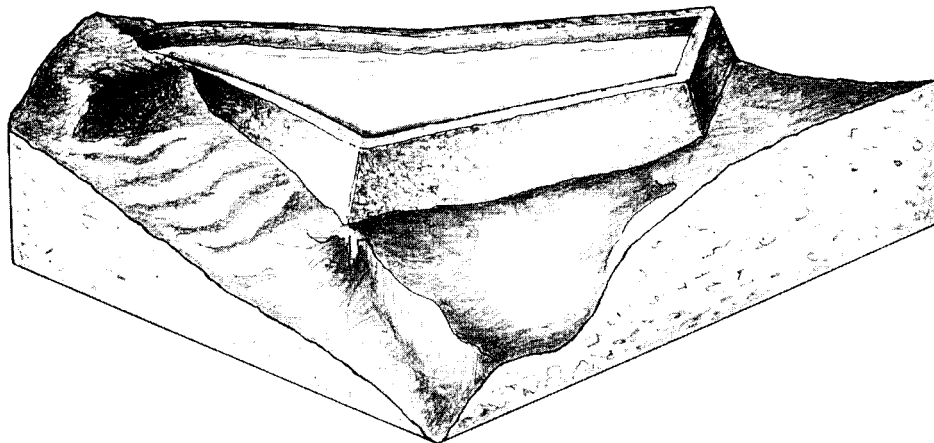
Valley site depository

Site de dépôt en vallée

C. Off-valley site

A site on flat or slightly sloping ground or gentle valley side slope may be the only available or the preferred option. An impoundment so located will require confining embankments around its full periphery or on the downhill sides (Fig.3). The ratio of storage volume to confining embankment volume may be low, making for a less economic impoundment. The advantages of this arrangement lie in the generally small quantity of natural runoff to be controlled, particularly for an impoundment totally surrounded by confining embankments, and the likelihood that the control of ground water pollution will be more readily achieved than in an impoundment penetrating below the natural ground surface or in a valley.

In practice an impoundment may fall into more than one category; an off-valley site, for example, may contain minor valleys, an existing pit may require confining embankments during later stages of deposition, etc. Two dams may be used in one valley, with a tunnel to carry the river past the confined impoundment. This categorisation serves mainly to emphasise the effects of different topographic conditions.



Le choix du site pour le dépôt des stériles peut dépendre du droit de propriété du sol, et de l'utilisation actuelle et future du site ainsi que de la zone avoisinante.

Les facteurs suivants interviennent dans le choix du site :

- (i) Proximité. Un site proche de l'usine conduira à de faibles coûts de transport.
- (ii) Endiguement. Un site avec une valeur élevée du rapport volume de stockage/volume d'endiguement est souhaitable ; toutefois, si les stériles sont utilisés pour la construction du barrage, ce facteur est moins limitatif.
- (iii) Topographie. Nonobstant le facteur (ii), on évitera un site présentant des pentes raides s'il conduit à une hauteur excessive du remblai, à des difficultés d'accès, ou à des risques d'instabilité, par exemple, Ok Ma, Papouasie Nouvelle-Guinée, où la construction du barrage a déclenché un important glissement de terrain, décrit par Fookes et al. (1991).
- (iv) Écoulement naturel. On évitera, si possible, un site comportant un grand bassin versant.
- (v) Altitude. Un site dont l'altitude est proche de celle de l'usine est favorable. Des sites au-dessus de l'usine nécessiteront des pompages très coûteux ; des sites à un niveau plus bas entraîneront des frais de pompage si l'eau en excès est retournée à l'usine.
- (vi) Conditions de fondation. Une fondation de mauvaise qualité peut se révéler un élément défavorable. Toutefois, la faible pente des talus de certains types de remblai et la tolérance habituellement plus grande pour la perméabilité du terrain de fondation (Chapitre 2.2.2.) font que les conditions de fondation sont moins contraignantes que pour un barrage avec une retenue d'eau.

Fig. 3
Off-valley depository
Site de dépôt en dehors d'une vallée

The selection of the site for disposal may be governed by land ownership and the current and future land use of both the site itself and the neighbouring areas. Where a choice of site is available the following factors are taken into account:

- (i) Proximity. A site close to the plant will result in lower transportation costs.
- (ii) Embankment Recovery. A site with a large ratio of storage volume to embankment volume is generally desirable, although when tailings are used for dam construction, this is not limiting.
- (iii) Topography. Notwithstanding the aim of (ii) a site with very steep slopes might be avoided if it would require an excessively high embankment, entail access difficulties or pose stability risks, e.g. Ok Ma, Papua New Guinea, where dam construction triggered a large landslide, described by Fookes et al (1991).
- (iv) Natural Runoff. A site with a large catchment area is avoided where possible.
- (v) Elevation. A site at an elevation close to that of the plant is favourable. Sites much higher than the plant would entail high pumping costs; sites much lower than the plant would entail pumping costs if the surplus water is to be returned to the plant.
- (vi) Foundation Conditions. Poor foundation conditions may cause a site to be disfavoured although the shallow slopes of some types of embankment and the usually greater tolerance to foundation permeability (Section 2.2.2) make for a wider range of acceptable foundation conditions than is normally associated with a dam for water storage.

- (vii) Sites de ressources minières. Les sites contenant probablement des ressources minières exploitables ne seront pas, si possible, retenus.
- (viii) Présence humaine. Les zones habitées et les zones d'activités humaines seront, si possible, écartées.
- (ix) Visibilité. Un site non visible, au moins partiellement, est préférable.
- (x) Effet sur l'environnement. Des sites contenant des espèces fragiles de flore ou de faune seront, si possible, évités.
- (xi) Nappe phréatique. On écartera les sites où la nappe phréatique risque d'être alimentée par de fortes percolations provenant de la retenue de stockage, en particulier lorsque cette nappe phréatique sert à l'alimentation en eau. Une solution consiste à utiliser un organe d'étanchéité pour empêcher une telle alimentation.
- (xii) Érosion. Les sites sujets à l'érosion par l'eau ou le vent seront, si possible, évités.

Quel que soit le type de stockage adopté, interviennent les méthodes :

- (a) d'acheminement des stériles,
- (b) de construction des remblais d'endiguement,
- (c) de dérivation ou de passage des écoulements naturels,
- (d) de mise en dépôt dans la retenue,
- (e) d'évacuation de l'excès de fluide de décantation et des apports naturels,
- (f) de prévention de la pollution au-delà des limites du dépôt.

Ces diverses méthodes sont examinées dans le sous-chapitre 2.2. et le chapitre 4.

2.2. LES DIVERSES OPÉRATIONS

La mise en dépôt des stériles comprend sept opérations principales :

- a) transport des stériles jusqu'au site de dépôt,
- b) construction de remblais pour le confinement des stériles dans le site,
- c) aménagement d'un ouvrage pour la dérivation des écoulements naturels autour ou à travers la zone de stockage,
- d) opération de mise en dépôt proprement dite dans la zone de stockage,
- e) réalisation d'un dispositif permettant d'évacuer l'excès d'eau de la retenue,
- f) mise en œuvre de toutes mesures en vue de protéger les environs de la pollution,

- (vii) Potential Mining Sites. Sites likely to contain exploitable mineral resources are avoided where possible.
- (viii) Human Presence. Populated centres and areas of human activity are avoided where possible.
- (ix) Visual Intrusion. A site at least partially hidden from public view is preferred.
- (x) Environmental Sensitivity. Sites containing endangered species of flora or fauna are avoided where possible.
- (xi) Groundwater Considerations. Sites which would result in excessive seepage from the impoundment into the groundwater are avoided, particularly where the groundwater is used for supply purposes. The alternative is complete sealing of the impoundment from the aquifer.
- (xii) Erosion. Sites which would be particularly prone to water or wind erosion should be avoided where possible.

For whichever of the types of impoundment is used for disposal, a number of systems of disposal is available in terms of the methods of:

- (a) delivery,
- (b) construction of the confining embankments,
- (c) diversion of, or passing the natural runoff,
- (d) deposition in the impoundment,
- (e) evacuation of surplus supernatant liquor and natural runoff, and
- (f) prevention of contamination beyond the confines of the depository.

Typical methods of dealing with each of these components of a tailings disposal system are outlined in Section 2.2, and Chapter 4.

2.2. SYSTEM COMPONENTS

For each tailings disposal arrangement seven main components are required:

- a) a system for the delivery of the tailings to the disposal site,
- b) embankments to confine the tailings within the site,
- c) an arrangement for diverting natural runoff around or through the depository,
- d) a system for the deposition of the tailings within the impoundment,
- e) a facility for the evacuation of excess supernatant water from the impoundment, and
- f) whatever measures are required to protect the surrounds from pollution.

g) dispositifs d'auscultation permettant d'assurer un contrôle continu et précis de la stabilité des ouvrages, et de la qualité des lâchures et de leurs effets sur l'environnement. Les ouvrages doivent être suffisamment robustes pour résister à la construction, d'exploitation simple, résistants aux attaques chimiques et adaptés à une exploitation à long terme.

Chaque opération et les dispositions généralement adoptées sont décrites brièvement ci-après.

2.2.1. Transport des stériles

Le transport des boues de stériles de l'usine au site de dépôt est le plus souvent effectué par conduite, mais on peut également utiliser un canal à ciel ouvert conduisant à un coût moins élevé. Compte tenu de sa fonction temporaire, la conduite est rarement enterrée.

Les matériaux le plus couramment utilisés pour la conduite sont l'acier (non revêtu) et le polyéthylène à haute densité. Pour la plupart des stériles, l'adoption du premier matériau, avec une conduite bien conçue et des vitesses modérées, conduit à un dispositif de pérennité satisfaisante et est souvent la solution la plus économique, en particulier dans les pays producteurs d'acier. Cependant, le polyéthylène à haute densité a l'avantage de présenter une plus grande résistance à l'usure résultant des éléments solides des boues, et ce matériau a été beaucoup utilisé, au cours de ces dernières années, principalement dans les pays industrialisés. La plus grande rigidité de l'acier, son bon comportement aux pressions élevées, la facilité de mise en place de la conduite, et les caractéristiques d'extension du polyéthylène à haute densité sont également des paramètres intervenant dans le choix du matériau.

Lorsque les stériles sont particulièrement abrasifs, le tracé de la conduite difficile ou le produit chimiquement agressif, on doit examiner d'autres matériaux de fabrication ou prévoir un revêtement.

Le Bulletin 101 (1995) traite, en détail, du transport, de la mise en place et de la décantation des stériles.

2.2.2. Remblais d'endiguement

Le remblai d'endiguement, qui empêche les matériaux mis en dépôt d'envahir les zones avoisinantes, est l'élément le plus important du dispositif de mise en dépôt, du point de vue de la sécurité. C'est souvent aussi l'ouvrage le plus coûteux de l'aménagement. Ces deux facteurs nécessitent la mise en œuvre de techniques de très haut niveau.

Les matériaux et les méthodes de construction des remblais d'endiguement varient beaucoup suivant les particularités du site choisi, la disponibilité de matériaux, et les plans de financement et d'exploitation de l'ensemble de l'installation. Le classement suivant peut être proposé :

- A. *Remblai de barrage classique*
- B. *Remblai classique construit par étapes*

g) instrumentation and monitoring systems to enable continuous accurate surveillance of the structural integrity of the impoundment and of the quality and effect of releases on the environment. Installations should be sufficiently robust to resist construction, simple in operation, resistant to chemical attack and suitable for long term operation.

The required duty of each component and the arrangements commonly used to fulfil the objectives are described briefly below.

2.2.1. Delivery system

Slurry transport from the plant to the site of disposal is most often undertaken by pipeline, but open channel conveyance is also used as it is cheaper. Having regard to the temporary nature of its duty, the pipeline is seldom buried.

The most commonly used pipeline materials are (unlined) steel and high density polyethylene. For most tailings products the use of the former, with careful design and moderate velocity, results in a satisfactorily long lasting system and may provide the most economic solution, particularly in countries where steel is produced internally. High density polyethylene has the advantage, however, of exhibiting greater resistance to wear from the solid content of the tailings and has been used extensively in recent years, particularly in the more developed countries. The greater rigidity of steel, its capabilities under high pressure, the relative simplicity of laying it and the expansion characteristics of high density polyethylene are factors also affecting the choice of material.

Where the tailings material is particularly abrasive, the pipeline layout particularly exacting or the product chemically aggressive, other materials of construction or the provision of a lining may need to be considered.

Details of transport, placement and decantation are dealt with in Bulletin No.101 (1995).

2.2.2. Confining embankments

The confining embankment, being the barrier against mass exodus of the material into the surrounds, is the most important component of the disposal system in relation to the safety of the arrangement. It is also frequently the most expensive part of the system. The combination of these factors dictates the need for the highest level of engineering input.

The construction materials and construction methods used in forming the confining embankments vary widely to accommodate the particular needs of the selected site, the availability of materials and the financial and operating policies of the entire operation. For convenience they may be classified into the categories listed as:

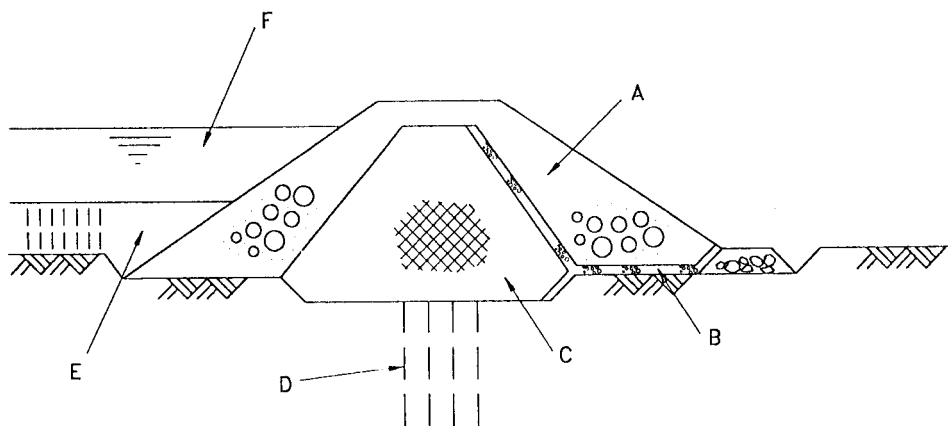
- A. *Conventional Dam Embankment*
- B. *Staged Conventional Embankment*

- C. Remblai construit par étapes, avec zone amont imperméable
- D. Remblai avec zone imperméable en stériles
- E. Corps du remblai d'endiguement constitué de stériles
- F. Construction par la méthode amont utilisant une plage ou des enclos (cuvettes)

La répartition des remblais d'endiguement suivant ces catégories traduit une progression depuis le remblai classique constitué de matériaux d'emprunt jusqu'à des types de remblai où il y a une utilisation croissante des stériles devant être stockés.

A. Remblai de barrage classique

Ce type d'ouvrage est adopté lorsqu'on doit stocker, à la fois, les stériles et l'eau au cours de toute la période allant du début du dépôt des stériles jusqu'à la fin de l'exploitation du site.



Le profil en travers du barrage est conçu pour s'adapter aux conditions de fondation et aux matériaux disponibles. Les stériles ne sont généralement pas utilisés pour la construction, puisque le barrage est complètement exécuté avant la mise en dépôt des stériles sur le site. Le profil en travers représenté sur la Fig. 4 comporte un noyau traditionnel, mais il existe de nombreuses solutions identiques à celles adoptées dans le cas des barrages de retenue d'eau. Les fondations et la zone étanche du remblai doivent maîtriser les percolations pour permettre un bilan hydraulique équilibré dans la retenue de stockage, respecter les contraintes d'environnement et prévenir la génération de pressions interstitielles excessives pouvant menacer la stabilité du remblai. Les fondations et les zones de remblai doivent être capables de supporter les charges de la digue proprement dite, de l'eau et des stériles ; les stériles seront considérés sous une forme solide ou une forme liquéfiée, lorsque leur poussée horizontale contre le remblai est plus grande que

- C. *Staged Embankment with Upstream Impermeable Zone*
- D. *Embankment with Tailings Impermeable Zone*
- E. *Embankment with Tailings in Structural Zone*
- F. *Upstream Construction using Beach or Paddock*

The arrangement of these categories is such that there is a progression from the more conventional type of embankment constructed of borrowed fill, to forms of embankment where increasing use is made of the tailings material to be confined.

A. Conventional dam embankment

This type of structure is constructed where the confinement is to be effected for both tailings and free water during the whole period, from the start of disposal of the tailings to the cessation of the use of the particular site selected.

Fig. 4

Type A - Conventional embankment dam
Barrage en remblai classique - Type A

- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| (A) Shoulder fill | (A) <i>Recharge en remblai</i> |
| (B) Filter drainage system | (B) <i>Filtre-drain</i> |
| (C) Core | (C) <i>Noyau</i> |
| (D) Foundation grouting | (D) <i>Rideau d'injection</i> |
| (E) Deposited tailings | (E) <i>Stériles mis en dépôt</i> |
| (F) Water in reservoir | (F) <i>Eau dans la retenue</i> |

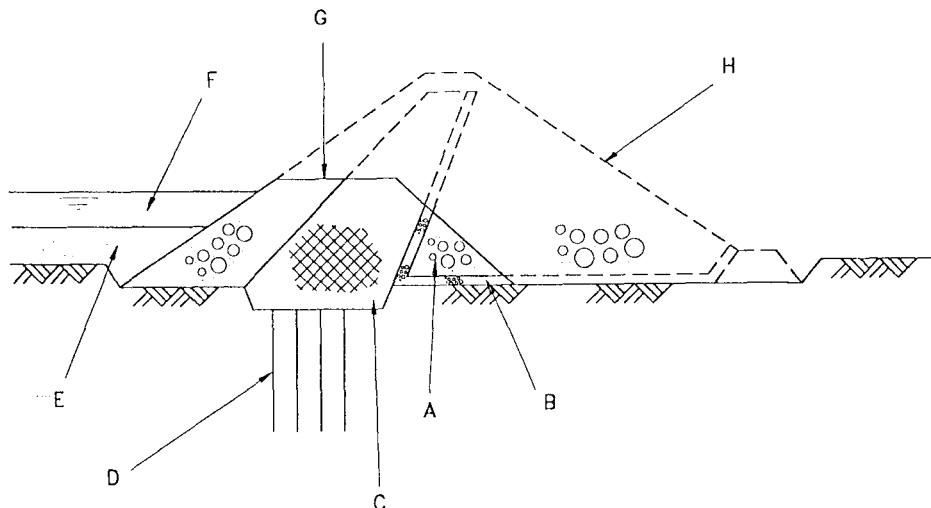
The dam section is drawn up to suit the conditions of the foundations and the available materials. Tailings products are generally not used for construction, since the dam is built completely before disposal takes place at this site. A conventional central core section is illustrated in Fig. 4 but the range of options is very wide and similar to that for dams designed to confine water alone. The foundations and water barrier portion of the embankment must be capable of controlling the passage of water to the extent required by the impoundment water balance, the impositions of environmental control and the prevention of the buildup of pore pressures such that the embankment stability could be threatened. The foundations and structural portions of the embankment must be capable of supporting the loads imposed by the dam structure and either the water or the tailings or both water and tailings in the impoundment; the tailings may need to be considered either in solid form or in a liquefied condition, when it would exert a greater horizontal thrust

celle exercée par de l'eau seule. Le dispositif filtrant doit permettre le passage de l'eau de percolation, à l'exclusion d'éléments solides.

Ce type de remblai d'endiguement est essentiellement un ouvrage de type conventionnel, créant une retenue dans laquelle l'eau est remplacée, au moins en partie, par les stériles au cours de la période de mise en dépôt. Il convient spécialement lorsqu'un stockage d'eau, généralement saisonnier, est nécessaire pour l'usine ou d'autres usages, lorsqu'on doit stocker l'eau des stériles sur une longue période en vue de la dégradation d'un élément toxique (par exemple, le cyanure dans certaines exploitations d'extraction d'or), ou lorsque les apports naturels dans la retenue sont importants ou sujets à des crues violentes, ce qui nécessite leur amortissement dans la retenue. Un des principaux avantages de ce type d'aménagement est que le barrage est conçu avec soin et que sa construction est de courte durée et parfaitement contrôlée, ce qui est rassurant pour l'exploitant et allège le contrôle du comportement du barrage au cours de la période d'exploitation. Un autre avantage est que l'ouvrage permet une protection contre la pollution par l'eau et l'érosion par le vent. Par contre, l'engagement de capitaux élevés avant la mise en service de l'ouvrage constitue le principal inconvénient ; le coût peut être également plus élevé que celui des autres types de remblai, en raison des lourdes fonctions demandées au remblai et de la nécessité d'importer tous les matériaux de construction non constitués par les stériles.

B. Remblai classique construit par étapes

Ce type de remblai a les mêmes caractéristiques que le type A ci-dessus, mais l'inconvénient de ce dernier, c'est-à-dire l'appel à des capitaux initiaux élevés, est réduit du fait de la construction par étapes, les coûts étant étalés sur la période de mise en dépôt. Une nouvelle étape de construction démarre lorsque la tolérance de revanche sur le parement amont du remblai est entamée par le dépôt de stériles, ou que la capacité de stockage des crues ou de stockage saisonnier devient insuffisante.



against the embankment than would be exerted by water alone. The filtration system must be capable of transmitting the seepage water effectively and without the passage of solids.

This type of confining embankment is essentially a structure built for the creation of a water reservoir in which water will be replaced, at least in part, by tailings during the deposition period. It is appropriate particularly where the impoundment is required for the storage of water, usually on a seasonal basis, for plant or other use, where the disposal site is in a remote and inaccessible location, where retention of the tailings water is needed over an extended period for the degradation of a toxic element (for example the cyanide discharged from some gold extraction operations) or where the natural inflow into the impoundment is large or subject to dramatic increase and water storage is needed for its control. One of the principal advantages of the arrangement lies in the opportunity it provides for a carefully designed dam with supervised construction in a relatively short time span, giving long term peace of mind for the operator and minimal need for ad hoc control of the development or supervision of the dam during the operational period. Another advantage is the protection afforded against pollution by water and wind erosion. The principal disadvantage is the need for high capital expenditure before the facility is operational; the cost may also be high, by comparison with that of other embankment types, in view of the onerous duty expected of the embankment and of the need for all construction materials to be imported and not obtained from the tailings.

B. Staged conventional embankment

This type of embankment has similar characteristics to the Type A embankment but the disadvantage of high initial capital cost is reduced by staging the construction so that the costs are spread more evenly over the period of deposition. The signal that a new stage of the embankment is to be constructed is given by the encroachment of the deposited tailings towards the freeboard allowance at the upstream face of the embankment or towards the reduction of the flood storage or seasonal storage capacity.

Fig. 5

Type B - Staged conventional embankment
Remblai classique construit par étapes - Type B

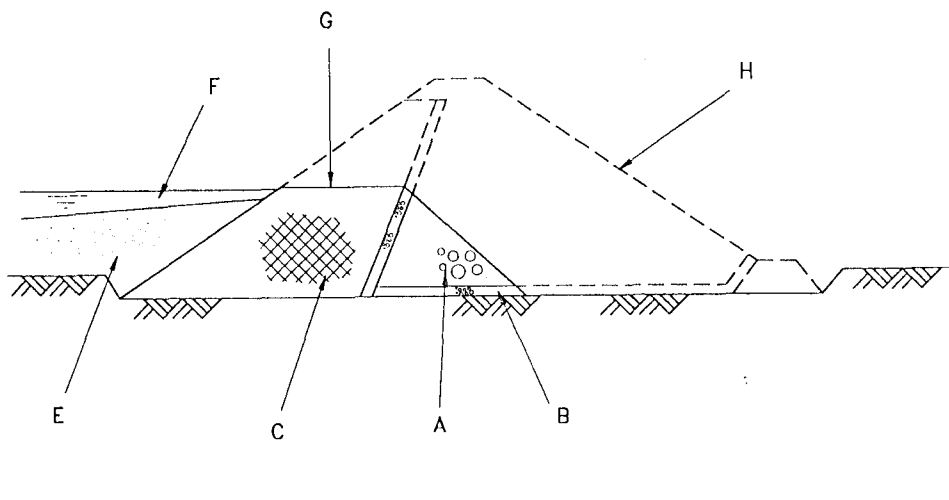
- | | |
|--------------------------------|--|
| (A) Shoulder fill | <i>A) Recharge en remblai</i> |
| (B) Filter drainage system | <i>(B) Filtre-drain</i> |
| (C) Core | <i>(C) Noyau</i> |
| (D) Foundation grouting | <i>(D) Rideau d'injection</i> |
| (E) Deposited tailings | <i>(E) Stériles mis en dépôt</i> |
| (F) Water in reservoir | <i>(F) Eau dans la retenue</i> |
| (G) Current embankment profile | <i>(G) Profil en travers actuel du remblai</i> |
| (H) Future embankment profile | <i>(H) Profil en travers futur du remblai</i> |

Ce type de remblai comporte souvent un noyau incliné permettant d'effectuer l'extension côté aval et de ne pas se fonder sur les stériles côté amont. Il est nécessaire d'implanter avec précision le noyau et le drain de la deuxième étape, par rapport à la première étape.

C. Remblai construit par étapes, avec zone amont imperméable

Si les stériles mis en dépôt se trouvent près ou au-dessus du niveau de l'eau de décantation dans la retenue de stockage, on peut placer la zone imperméable du remblai sur le talus amont. Cela est possible si des stériles et de l'eau sont stockés dans la retenue, alors que cela peut ne pas être possible si de l'eau seule y est stockée ; en effet, les stériles déposés peuvent contribuer à la stabilité amont et les conditions de vidange sont moins sévères. La zone imperméable située sur le talus amont intervient avec les stériles mis en dépôt pour isoler le barrage proprement dit et les fondations de toute eau stockée. Le rôle de la fondation dans la coupure des percolations sous la base de la zone imperméable est alors allégé, et les dimensions et la qualité de la zone imperméable elle-même peuvent être réduites. Un tel ouvrage peut être implanté sur une fondation relativement perméable puisque l'objectif est de réduire fortement le gradient hydraulique entre la retenue et la zone aval du remblai, dans les parties basses du barrage.

Au début de la construction du remblai, avant que les stériles atteignent leur profil d'équilibre, de l'eau sera susceptible d'être au contact de la partie basse du remblai, sur une profondeur importante, jusqu'à ce que la montée des stériles contre le remblai contribue à l'étanchéité. Un petit barrage, destiné à retenir l'eau sans participation des stériles à l'étanchéité, doit donc être construit (il est souvent appelé « remblai d'amorce »). Un tel barrage est toujours nécessaire dans les sites en vallée ou sur le bord aval des sites en dehors de vallée, où les stériles mis en dépôt participent à la constitution des remblais d'endiguement.



A sloping core is often provided for this type of embankment to permit the extension to be effected on the downstream side and not founded on the deposited tailings on the upstream side. Accurate location of the second stage core and drain, related to the first stage, is required.

C. Staged embankment with upstream impermeable zone

If the deposited tailings lie close to or above the level of the supernatant water in the impoundment, the impermeable zone of the embankment may be conveniently located on its upstream face. This may be possible if both tailings and water are stored in the impoundment where it may not be possible if pure water is stored since the deposited tailings may act in support of upstream stability and the drawdown condition is less severe. With the impermeable zone on the upstream face it may act in conjunction with the deposited tailings to isolate the structural zone of the dam and foundations from any stored water. The duty of the foundations in the prevention of seepage across the footprint of the impermeable zone may in these circumstances be eased and the dimensions and quality of the impermeable zone itself may be reduced. Such a structure may be sited on relatively permeable foundations since the overall effect is to reduce substantially the hydraulic gradient between the reservoir and the downstream side of the embankment in the lower reaches of the dam.

In the early stages of the life of the embankment, however, before the tailings disposal pattern has been established, water will be liable to lie against the lower part of the embankment at a considerable depth until the deposited tailings level has risen against the embankment to assist in the provision of the seal. A small dam structure, capable of retaining water without the assistance of the tailings seal, has consequently to be constructed, normally termed a "starter dam". Such a dam is always required in valley sites or on the downstream sides of off-valley sites where the deposited tailings is intended to fulfil a functional role in the confining embankment.

Fig. 6

Type C - Staged embankment with upstream impermeable zone

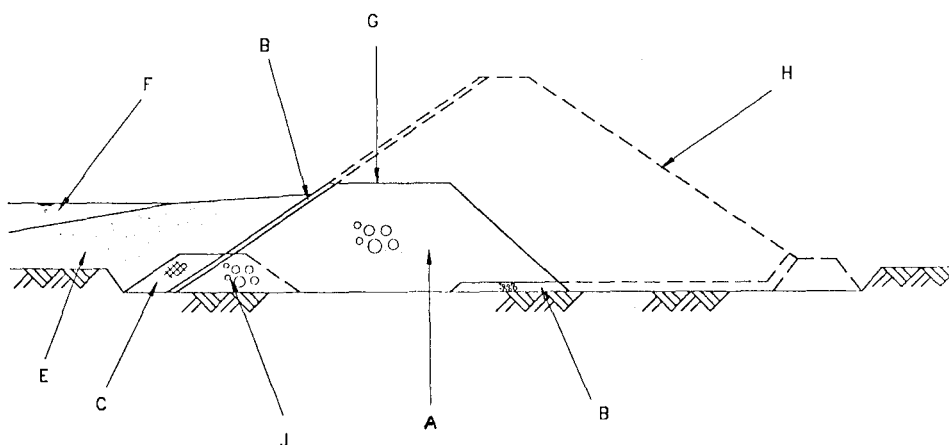
Remblai construit par étapes, avec zone amont imperméable - Type C

- | | |
|--------------------------------|--|
| (A) Shoulder fill | (A) <i>Recharge en remblai</i> |
| (B) Filter drainage system | (B) <i>Filtre-drain</i> |
| (C) Core | (C) <i>Noyau</i> |
| (E) Deposited tailings | (E) <i>Stériles mis en dépôt</i> |
| (F) Water in reservoir | (F) <i>Eau dans la retenue</i> |
| (G) Current embankment profile | (G) <i>Profil en travers actuel du remblai</i> |
| (H) Future embankment profile | (H) <i>Profil en travers futur du remblai</i> |

D. Remblai avec zone imperméable en stériles

Lorsque la mise en dépôt des stériles s'effectue, en totalité ou en partie, depuis le remblai, une plage de stériles peut se former, celle-ci pouvant souvent, à elle seule, constituer la zone moins perméable de l'ouvrage, en jouant le rôle d'un tapis horizontal. Par suite du faible gradient hydraulique qui en résulte, il n'est pas nécessaire d'effectuer un traitement important de la fondation sous la zone imperméable ; parfois même, lorsque la fondation est suffisamment fermée pour empêcher le passage d'éléments solides, une fondation relativement perméable est intéressante pour la dissipation rapide des pressions interstitielles dans la zone du tapis et pour l'amélioration de la stabilité du remblai. L'inconvénient est que le drainage à travers le sol de fondation ne peut se faire s'il y a risque de pollution de l'eau souterraine. Dans ce cas, on peut empêcher un tel drainage en adoptant une couche imperméable recouverte d'un dispositif filtre-drain qui évacuera l'eau de percolation dans un bassin aval de récupération, cette eau étant retournée dans la retenue par pompage ou acheminée vers l'usine de traitement. L'élimination de la zone imperméable constituée de matériaux d'emprunt peut entraîner une réduction appréciable de coût ; par contre, on doit généralement mettre en place une zone de transition filtrante entre les stériles de la plage et les matériaux de remblai du barrage proprement dit.

Ces dispositions sont seulement possibles lorsque les apports d'eau dans la retenue de stockage ne conduisent pas à une élévation du niveau de l'eau au-dessus du point le plus haut de la plage, contre les matériaux plus perméables du remblai. Les bassins versants de grande superficie peuvent entraîner une telle élévation de niveau ; pour les bassins versants de superficie moyenne, il est nécessaire d'adopter un procédé de mise en dépôt des stériles permettant d'avoir un niveau adéquat de plage à tout moment. Un « remblai d'amorce » identique à celui mentionné pour le barrage de type C sera nécessaire. L'adoption d'un tel schéma nécessite beaucoup d'attention et une grande sûreté d'exploitation.



D. Embankment with tailings impermeable zone

Where all or a part of the tailings deposition into the impoundment is effected from the embankment a beach of tailings may be formed and it is then often possible for the tailings beach on its own to provide the less permeable zone of the system, adopting the role of a horizontal blanket. The low hydraulic gradient that results eliminates the need for extensive foundation treatment under the impervious zone and indeed, provided the foundations are not so open as to permit the passage of solids, a more permeable foundation is in many instances advantageous in enabling the pore pressures in the blanket zone to be dissipated more rapidly and improving the stability of the embankment. There is a disadvantage that downward drainage into the foundation soil may not be allowed if there is risk of polluting the ground water. In these cases, an impervious layer may be used to prevent downward drainage, covered by a filter and drainage system that will discharge into a downstream reclaim pond, to be pumped back on to the impoundment or direct to the processing plant. The cost benefit of the elimination of the impermeable zone constructed of borrowed material may be appreciable but a transitional filter system is normally needed between the beach tailings and the material in the structural zone of the embankment.

This arrangement is only possible where the inflow of water into the impoundment will not allow the impoundment water level to rise above the uppermost level of the beach and against the more pervious embankment material. At impoundments with large catchment areas it may not be practical to ensure this and at impoundments with more modest catchment areas it is necessary to incorporate a tailings disposal strategy to provide an adequate beach height at all times. A "starter dam", similar to that described for dam type C, will be needed. Great care and operational certainty is required for the safe adoption of this scheme.

Fig. 7

Type D - Embankment with tailings impermeable zone

Remblai avec zone imperméable en stériles - Type D

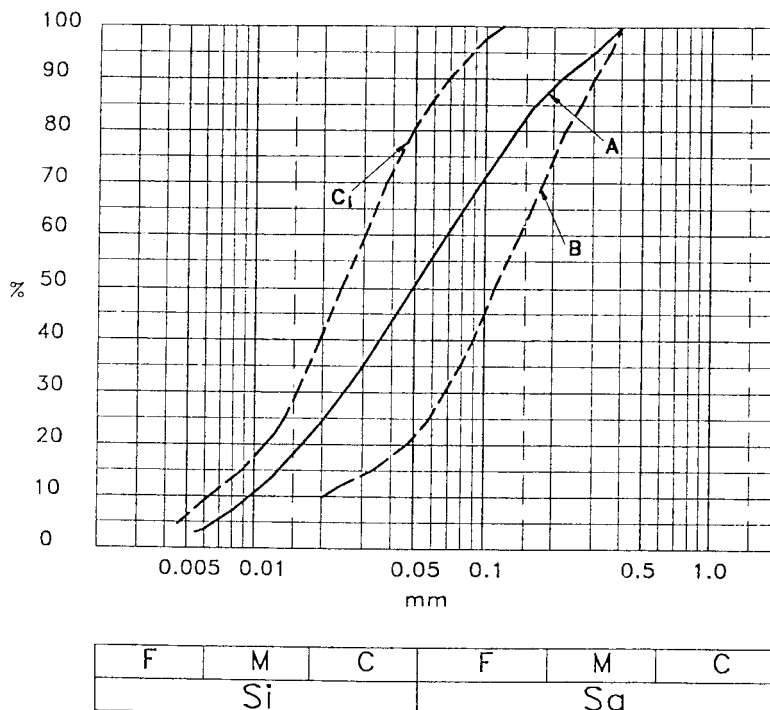
- | | |
|-------------------------------------|---|
| (A) Borrowed fill (normally gravel) | (A) <i>Remblai d'emprunt (généralement, du gravier)</i> |
| (B) Filter drain (if required) | (B) <i>Filtre-drain (si nécessaire)</i> |
| (C) Impermeable barrier | (C) <i>Zone imperméable</i> |
| (E) Deposited tailings | (E) <i>Stériles mis en dépôt</i> |
| (F) Water in reservoir | (F) <i>Eau dans la retenue</i> |
| (G) Current embankment profile | (G) <i>Profil en travers actuel du remblai</i> |
| (H) Future embankment profile | (H) <i>Profil en travers futur du remblai</i> |
| (J) Starter dam | (J) <i>Remblai d'amorce</i> |

E. Corps du remblai d'endiguement constitué de stériles

Dans le remblai du type D, on utilise les stériles mis en dépôt pour constituer un écran étanche. Une autre solution, souvent plus économique, consiste à utiliser les stériles pour la construction du corps du remblai d'endiguement.

En se reportant à la Fig. 19, on peut constater que les stériles (acheminés par voie hydraulique) sont en général constitués d'éléments dont une grande proportion se classe dans la catégorie « silt » ; la totalité des stériles ne convient donc pas généralement à la construction du corps du remblai d'endiguement. De plus, se pose le problème de la séparation de l'excès d'eau avant que le produit puisse être mis en place dans le remblai en tant que matériau solide et dense.

Cependant, il y a généralement suffisamment d'éléments grossiers dans le produit pour qu'on puisse réaliser une séparation et utiliser la fraction grossière comme matériau granulaire drainant (matériau, en général, sableux). Cela est obtenu traditionnellement au moyen d'une mise en dépôt sur une plage (voir chapitre 3). La séparation peut aussi être réalisée en utilisant des hydrocyclones dans lesquels les matériaux sont introduits sous pression et subissent une rotation hélicoïdale provoquant une sédimentation accélérée. Le débit de fond (underflow) contient les gros éléments et peu d'eau, alors que le débit de surface ou débit en suspension (overflow) contient les éléments fins avec une forte proportion d'eau. Les méthodes de mise en place au moyen d'hydrocyclones sont traitées dans le Bulletin 101 (1995). Une classification granulométrique type est représentée dans la Fig. 8.



E. Embankment with tailings in structural zone

Embankment Type D makes use of the deposited tailings as a water barrier in the system. A further, and often even more cost effective arrangement, is to use the tailings as a constructional material in the structural zone of the embankment.

By reference to Fig. 19 it may be observed that a tailings product (delivered hydraulically) is normally composed of an assembly of particles of which a large proportion are in the silt category and the total product would not usually be considered to be suited to use in the structural zone of an embankment. Additionally there would be the problem of the separation of surplus water from the solids before the product could be placed as a dense material in the structural zone.

There is usually, however, enough coarser material within the product for this to be separated out to be used as a more freely draining granular (normally sandy) material. This is achieved traditionally by deposition on a beach: a matter discussed in Chapter 3. Separation can also be undertaken by the use of hydrocyclones into which the material is fed under pressure and undergoes spiral rotation causing accelerated sedimentation. The coarser particles are discharged as "underflow" at a moderately high percentage of solids, while the finer products ("overflow") are discharged separately with most of the water. Methods of placement with cyclones are discussed in Bulletin No.101 (1995). A typical classification is illustrated in Fig.8.

Fig. 8

Classification by hydrocyclone

Classification granulométrique type obtenue par hydrocyclone

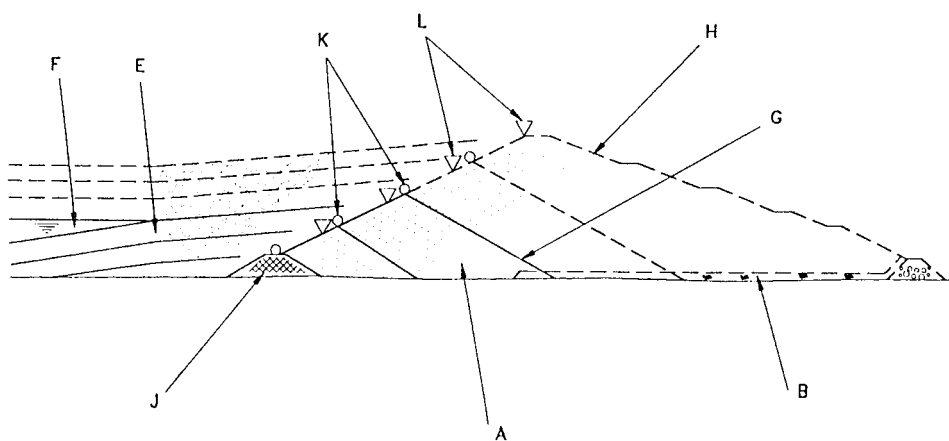
Si - Silt
Sa - Sand
F - Fine
M - Medium
C - Coarse
A - Tailings product
B - Hydrocyclone underflow
C₁ - Hydrocyclone overflow

*Si - Silt
Sa - Sable
F - Fin
M - Moyen
C - Grossier
A - Stériles avant séparation
B - Débit de fond de l'hydrocyclone
C₁ - Débit de surface de l'hydrocyclone*

Le débit de fond de l'hydrocyclone ayant une forte proportion d'éléments solides et une résistance au cisaillement élevée lorsqu'il est évacué par une conduite, l'opération de séparation doit normalement s'effectuer le plus près possible du point de mise en dépôt. Cela est généralement réalisé sur le remblai lui-même ; mais, lorsque les versants de la vallée, dans la zone de dépôt, sont raides, l'opération peut être exécutée sur le versant avec transport par conduite jusqu'au point de mise en dépôt. Une autre solution consiste à utiliser des hydrocyclones plus petits, mobiles, fonctionnant sur ou à proximité de la crête du barrage en cours d'avancement. Cette solution nécessite plus de main-d'œuvre, mais peut être plus souple et mieux adaptée dans certaines circonstances. Lors du dépôt, l'eau restante s'évacue du matériau qui, en définitive, forme un talus relativement raide, dont la pente de 1 : 2 à 1 : 5 environ dépend de la granulométrie, de la teneur en eau et du débit de décharge. Le débit de surface provenant de l'hydrocyclone est déchargé directement dans la retenue de stockage contre le talus amont.

E.1 Construction par la méthode aval

La fraction grossière des stériles, séparée par l'hydrocyclone, peut être utilisée pour constituer la totalité ou une grande partie du corps du remblai d'endiguement. La taille de l'hydrocyclone est choisie de façon qu'une batterie d'appareils fonctionnant en parallèle puisse traiter la totalité des stériles. La conduite d'apport et la batterie de prises pour hydrocyclone sont situées, à l'origine, sur la crête du remblai d'amorce ; le débit de fond est déchargé à l'aval pour construire le remblai et le débit de surface est déchargé dans la retenue de stockage, comme indiqué sur la Fig. 9. Le talus amont du remblai ainsi constitué peut nécessiter un réglage de forme avec création d'une risberme à un niveau supérieur pour y installer la conduite d'apport et la batterie de prises pour hydrocyclone, au fur et à mesure que le niveau du remblai d'endiguement monte. Une autre solution consiste à installer de grands hydrocyclones sur le versant de la vallée, au-dessus du niveau maximal de la crête, le débit de fond et le débit de surface étant acheminés par conduite jusqu'au remblai. Cette méthode de mise en dépôt est appelée « méthode aval », du fait qu'au fur et à mesure de la montée du barrage la crête se déplace vers l'aval.



Since the underflow product of the hydrocyclone has a high solids content and high frictional resistance when discharged through a pipeline the separation process is normally undertaken as close as possible to the point of deposition. This is usually undertaken on the embankment itself but, where the valley sides of the depository are steep, may be undertaken on the flank and piped to the point of deposition. Alternatively use may be made of smaller, portable hydrocyclones, operated on or near the advancing crest of the dam. This method is more labour intensive, but may be more flexible and be better suited to certain circumstances. On deposition the remaining water drains from the material and it finally comes to rest to form a relatively steep slope varying from about 1:2 to 1:5, depending on the particle size distribution, water content and throughput. The “overflow” from the hydrocyclone is discharged directly into the impoundment against the upstream slope.

E.1 Downstream construction.

The coarse fraction of the tailings, separated by hydrocyclone, may be used to form the complete structural portion of the embankment or a large part of it. The size of hydrocyclone is selected such that a bank of them acting in parallel can deal with the total tailings throughput. With the tailings delivery line and bank of hydrocyclone offtakes located initially on the crest of the starter dam, the underflow is discharged downstream to form the embankment, and the overflow is discharged into the impoundment, as illustrated in Fig.9. The upstream face of the embankment so created may need to be shaped and a berm formed at a higher level to enable the delivery pipeline and hydrocyclone bank to be raised, as the level of the impoundment rises. As an alternative, large hydrocyclones may be housed on the valley side, above maximum crest height, with both underflow and overflow piped down to the embankment. This method of deposition is termed the ‘downstream’ method because as the dam height rises, the crest moves downstream.

Fig. 9

Type E₁. Embankment construction using downstream method

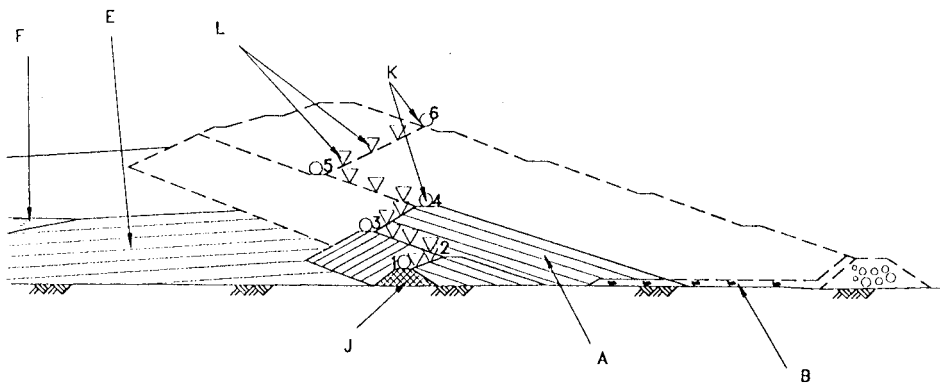
Construction du remblai par la méthode aval - Type E₁

(A) Structural zone formed with hydrocyclone underflow	(A) <i>Corps du remblai constitué par le débit de fond de l'hydrocyclone</i>
(B) Filter drain	(B) <i>Filtre-drain</i>
(E) Beach formed with hydrocyclone overflow	(E) <i>Plage constituée par le débit de surface de l'hydrocyclone</i>
(F) Water in reservoir	(F) <i>Eau dans la retenue</i>
(G) Current embankment profile	(G) <i>Profil en travers actuel du remblai</i>
(H) Future embankment profile	(H) <i>Profil en travers futur du remblai</i>
(J) Starter dam	(J) <i>Remblai d'amorce</i>
(K) Successive tailings pipeline locations	(K) <i>Emplacements successifs de la conduite d'apport des stériles</i>
(L) Successive hydrocyclone or deposition locations	(L) <i>Emplacements successifs de l'hydrocyclone ou de mise en dépôt</i>

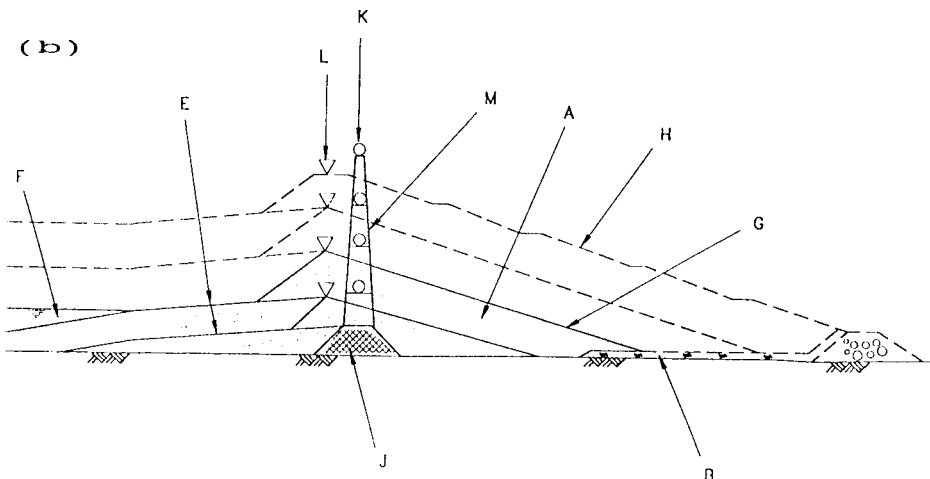
E.2 Construction par la méthode de l'axe central

La construction par la méthode aval nécessite un volume important de stériles grossiers pour la constitution du remblai d'endiguement, ainsi qu'une grande superficie de sol sous l'emprise du barrage. Lorsque la proportion de stériles grossiers séparés par l'hydrocyclone est insuffisante pour permettre à la construction du remblai de se maintenir en avance par rapport à la montée du niveau de la retenue de stockage des stériles, la zone de stériles du remblai nécessite parfois une zone supplémentaire constituée de matériaux d'emprunt pour accélérer la construction du remblai. En vue d'éviter un tel apport de matériaux d'emprunt, la zone amont du remblai peut être constituée de matériaux de moins bonne qualité mécanique, c'est-à-dire par la plage de stériles déposés. Cela est possible du fait que le parement amont du remblai est soutenu par les stériles au fur et à mesure de leur montée. La Fig. 10 représente un tel ouvrage, la méthode étant appelée « construction par la méthode de l'axe central ».

(a)



(b)



E.2 Centreline construction.

The 'downstream' method of construction entails the use of a considerable volume of coarse tailings for the embankment, and an area of land under the 'foot-print' of the dam. Where the proportion of coarse tailings separated out by hydrocyclone is insufficient to permit the embankment construction to keep ahead of the rise of the impoundment level, the tailings zone may need to be supplemented by a zone of borrowed fill material to speed up embankment construction. As an alternative to the supplementary use of borrowed material, the upstream portion of the embankment may be composed of less structurally competent materials and may be formed by the beach of the deposited tailings. This is possible because the upstream face of the embankment is being progressively supported by the rise of tailings. The resultant structure is illustrated in Fig.10 and the method is generally termed the "centreline" method.

Fig. 10

Type E₂. Embankment construction using centreline method

Construction du remblai par la méthode de l'axe central - Type E₂

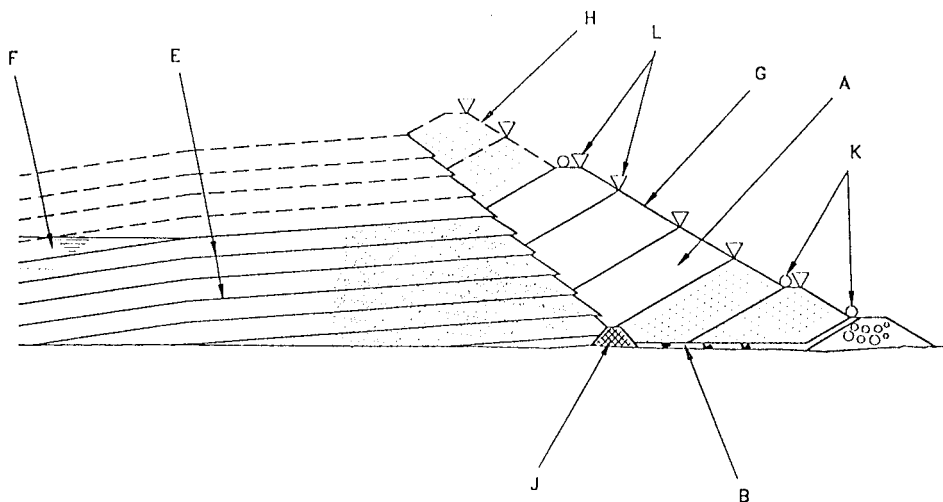
- | | |
|--|---|
| (A) Structural zone formed with hydrocyclone underflow | (A) Zone du remblai constituée par le débit de fond de l'hydrocyclone |
| (B) Filter drain | (B) Filtre-drain |
| (E) Beach formed with hydrocyclone overflow | (E) Plage constituée par le débit de surface de l'hydrocyclone |
| (F) Water in reservoir | (F) Eau dans le réservoir |
| (G) Current embankment profile | (G) Profil en travers actuel du remblai |
| (H) Future embankment profile | (H) Profil en travers futur du remblai |
| (J) Starter dam | (J) Remblai d'amorce |
| (K) Successive tailings pipeline locations | (K) Emplacements successifs de la conduite d'apport des stériles |
| (L) Successive hydrocyclone or deposition locations | (L) Emplacements successifs de l'hydrocyclone ou de mise en dépôt |
| (M) Staging | (M) Échafaudage |

Dans cette méthode, le remblai d'amorce est implanté près de l'axe vertical de la crête du remblai final et le débit de fond (underflow) est déchargé à l'aval. Lorsque le dépôt a atteint le niveau à partir duquel la conduite d'alimentation et la batterie d'hydrocyclones doivent être remontées, le débit de fond provenant de la nouvelle position est déversé à l'amont de la ligne d'alimentation (Fig. 10 a). La configuration en zigzag se maintient tout au long de la construction du remblai.

Une variante de la construction par la méthode de l'axe central consiste à supporter la ligne d'alimentation, au moyen d'un échafaudage, au-dessus du niveau du dépôt et à la remonter suivant la verticale, à de courts intervalles, comme l'indique la Fig. 10 b.

E.3 Construction par la méthode amont au moyen d'hydrocyclones

La mise en dépôt du débit de fond ainsi que du débit de surface à l'amont de la conduite d'alimentation est appelée « méthode amont de construction » et a été fréquemment utilisée pour construire la totalité du remblai d'endiguement. Dans cette méthode, l'utilisation de la fraction grossière des stériles s'avère très économique car seule une zone externe mince se forme.



La méthode amont est représentée sur la Fig. 11. Le principal inconvénient de cette méthode a concerné, dans le passé, les problèmes de stabilité et de liquéfaction. Lors de la mise au point du projet, on doit porter une grande attention au contrôle de la ligne de saturation en prévoyant un drainage efficace. Les stériles fins provenant du débit de surface présentent souvent une résistance plus faible que celle des stériles grossiers et sont moins denses, étant donné qu'ils sont déposés avec une forte teneur en eau, ou qu'ils se drainent, se consolident ou se dessèchent difficilement. Leur moins grande perméabilité peut également conduire à une ligne de saturation élevée, traduisant le développement de pressions interstitielles. En ce qui concerne la stabilité du talus aval, ces matériaux peuvent consti-

The starter dam is built immediately below the position for the crest of the final embankment, and 'underflow' discharged downstream. When the deposition has reached the stage where the delivery pipeline and hydrocyclone bank are raised, the 'underflow' from the new position is now discharged on the upstream side of the delivery line, as indicated by Fig. 10a. This zigzag pattern of deposition is continued throughout the construction of the embankment.

An alternative method of building up a 'centreline' method embankment is to support the delivery line on a staging above the deposition level and to raise it at short intervals in a vertical line, as illustrated by Fig. 10b.

E.3 Upstream construction using cyclones.

The deposition of both 'underflow' and 'overflow' on the upstream side of the delivery pipeline is termed the 'upstream' method of construction and has frequently been used to construct an entire embankment. It is very economical in the use of the coarser fraction of the tailings since only a thin outer zone of this material may result.

Fig. 11

Type E₃. Embankment constructed with cyclones using upstream method

Construction du remblai par la méthode amont, au moyen d'hydrocyclones - Type E₃

- | | |
|--|---|
| (A) Structural zone formed with hydrocyclone underflow | (A) Zone du remblai constituée par le débit de fond de l'hydrocyclone |
| (B) Filter drain | (B) Filtre-drain |
| (E) Beach formed with hydrocyclone overflow | (E) Plage constituée par le débit de surface de l'hydrocyclone |
| (F) Water in reservoir | (F) Eau dans la retenue |
| (G) Current embankment profile | (G) Profil en travers actuel du remblai |
| (H) Future embankment profile | (H) Profil en travers futur du remblai |
| (J) Starter dam | (J) Remblai d'amorce |
| (K) Successive tailings pipeline locations | (K) Emplacements successifs de la conduite d'apport des stériles |
| (L) Successive hydrocyclone or deposition locations | (L) Emplacements successifs de l'hydrocyclone ou de mise en dépôt |

The 'upstream' method is illustrated in Fig.11. The principal disadvantage of the system has in the past been associated with stability and its susceptible to liquefaction. Care must be taken in design in order to control the phreatic surface, which can be achieved by correct drainage. The finer tailings discharged as "overflow" is often intrinsically weaker than the coarser fraction and less dense since it is either deposited under water or may not be able to drain, consolidate or desiccate. Its less permeable nature may also result in a high phreatic surface indicating the development of pore pressures. The material can form a weak zone with respect to downstream slope stability and the 'upstream' method is consequently only used where it can be demonstrated that the finer material is rendered strong

tuer une zone de faible résistance ; la méthode amont ne sera donc utilisée que lorsqu'il sera démontré que les matériaux fins deviennent suffisamment résistants par drainage et/ou dessiccation pour fournir un support convenable au talus. La stabilité revêt une grande importance dans les zones de forte sismicité.

F. Méthode amont de construction utilisant une plage ou des enclos (bassins)

Le dernier type de remblai à examiner est le plus ancien et le plus classique : les stériles sont triés en utilisant une plage au lieu d'un hydrocyclone. Cette méthode permet une utilisation maximale des stériles mis en décharge pour la construction de l'endiguement ; dans les régions où les conditions de climat, de topographie et de coût de la main-d'œuvre sont favorables, cette méthode peut s'avérer la moins coûteuse. Le succès de ce procédé repose sur la formation d'une plage satisfaisante en exerçant un contrôle de l'implantation des dispositifs de déversement et un contrôle de la durée de déversement des matériaux en chaque point. Autrefois, lorsqu'une large plage était constituée, le sable était pelleté manuellement, depuis son niveau supérieur près de la crête, pour surélever le bord aval de la crête et assurer ainsi que les stériles déversés s'écoulaient sur la plage vers la retenue, et non sur le talus aval du barrage. L'angle de ce talus dépendait de la valeur du décrochement de la crête vers l'amont, par rapport au niveau sous-jacent, lors de chaque surélévation successive. A l'époque où la géotechnique n'était pas encore appliquée aux études de projet, il y avait un risque de constituer un talus trop raide. Un barrage construit par cette méthode, d'une hauteur de 92 m, avec une pente aval de près de 2 sur 1 (angle de 60°), a été décrit par Casagrande et McIver (1970).

Aujourd'hui, il est plus courant de commencer par la construction d'un remblai d'amorce au moyen d'un engin de terrassement, en utilisant de la terre prélevée localement ou des déchets d'enrochement, comme indiqué dans la Fig. 12. Le talus aval est élevé au moyen de diguettes, construites par des engins légers travaillant sur la plage, en utilisant le sable de cette plage, et implantées de façon à constituer l'angle du talus aval défini lors du projet et parfaitement contrôlé. La formation de la plage est traitée dans le chapitre 3.9.1.

F.1 Mise en dépôt des stériles au moyen de buses de déversement (spigots)

Un dispositif très simple, constitué de caniveaux et de canalisations en bois, permettait de transporter par gravité les stériles de l'usine de traitement jusqu'au barrage. Une canalisation supportée par des chevalets le long de la crête avait de nombreuses ouvertures latérales par lesquelles les stériles étaient déversés sur la plage, ces ouvertures pouvant être fermées au moyen de panneaux en bois. Plus récemment, avec des stériles pompés et transportés par canalisation, le déversement s'effectue au moyen de branchements ou buses (spigots) à partir de la canalisation principale, chaque branchement étant contrôlé par une vanne. Les stériles sont déversés sur la plage depuis plusieurs buses, les autres tronçons étant fermés pour permettre le drainage de la plage et la construction de talus en vue de la levée suivante.

La plage ainsi constituée par ce procédé de mise en dépôt doit être relativement plate pour permettre une bonne séparation granulométrique, ce qui nécessite une grande largeur de plage pour créer une revanche satisfaisante au-dessus du

enough by drainage and/or desiccation to provide adequate support to the slope. Stability is of major concern in areas of high seismicity.

F. Upstream construction using a beach or paddock

The final embankment type to be discussed is the older, traditional one, in which the tailings material is size sorted by use of a beach instead of a cyclone. This method makes maximum use of the tailings product itself for confinement, and in areas with suitable climate, topography and labour costs, may provide the cheapest system of disposal. The system relies for its success on the formation of a satisfactory beach by control of the deployment of the discharge arrangements and the control of the length of time material is discharged from each point. At one time, when a broad beach was established, the sand from its upper end near the crest was shovelled by hand to raise the downstream edge of the crest to ensure that the discharged tailings flowed down the beach, rather than down the developing downstream slope of the dam. The angle of this slope was controlled by the amount that each successive hand raising of the crest edge was moved upstream in relation to the underlying ridge. In days before the principles of geomechanics were applied to design, there was a danger that the slope might be made too steep. A dam built by this method to a height of 92m with a downstream slope of almost 2 on 1 (actually 60°) has been described by Casagrande and McIver (1970).

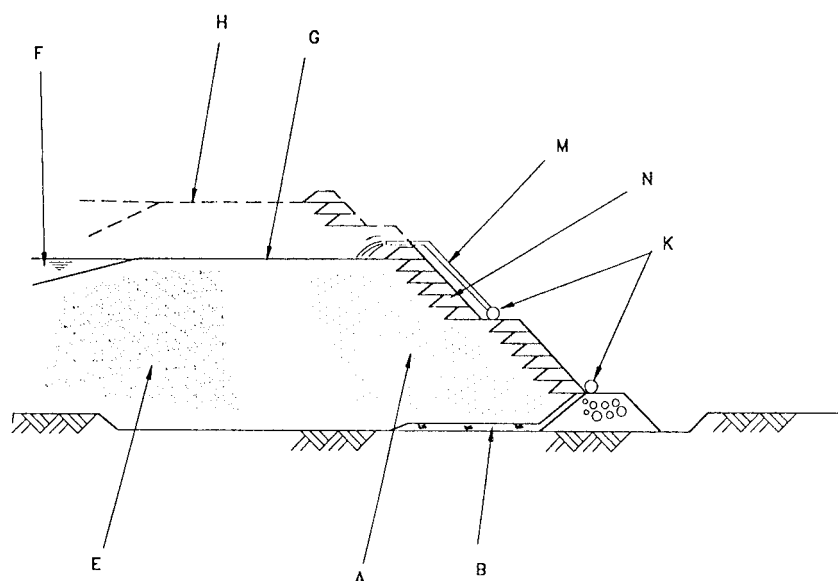
Nowadays it is more usual to begin with a starter dam built by machine from local earthfill or waste rockfill, as indicated by Fig 12, and to raise the downstream slope with small dykes, built from the beach sand by light machines working on the beach, placed so as to form a designed and controlled downstream slope angle. Beach formation is discussed in Section 3.9.1.

F.1 Spigot disposal method

A very simple system brought tailings by gravity from the processing plant, along ditches and timber flumes (channels) on to the dam. A flume carried on stakes along the crest, had numerous side openings, that could be closed by timber flaps as required, to discharge the tailings on to the beach. More recently, with pumped tailings transported through pipes, offtakes are made through branches or 'spigots' from the main delivery pipe, each controlled by a valve. The tailings are poured on to the beach from several spigots, other sections being turned off to allow of beach drainage, and the construction of dykes, ready for the next lift.

The beaches generated by this method have to be relatively flat to allow of best size separation, and it consequently requires an extended width of beach for an appreciable freeboard to be created above the supernatant pond level in the

niveau du fluide de la retenue. Cette méthode ne convient donc qu'aux sites où les apports d'eau dans la retenue de stockage sont peu importants - sites en dehors de vallée, ou sites en vallée comportant une dérivation efficace de la rivière - ainsi qu'aux stériles ayant une proportion importante de particules grossières et une teneur relativement forte en éléments solides. Bien que la configuration générale soit la présence de matériaux grossiers dans les zones externes du remblai, quelques couches de matériaux fins se forment près de ces zones externes, par suite de variations dans le mode opératoire et de la présence de zones « mortes » dans la plage, ce qui a des répercussions sur la stabilité de l'ouvrage.



F.2 Méthode semi-aérienne de mise en dépôt des stériles

Une évolution récente de la méthode de mise en dépôt type « plage » a conduit à la méthode appelée « semi-aérienne » ou « des couches minces ». Dans cette méthode, on utilise également le drainage et la dessiccation des stériles pour obtenir la résistance, la mise en dépôt devant être particulièrement bien contrôlée. Les stériles sont déversés comme dans la méthode des buses de déversement, mais on utilise ici, à la place des buses, une rampe d'aspersion pour réaliser un dépôt plus uniforme. Ce procédé conduit à une nappe d'écoulement sur la plage dont la pente est plus raide. La zone de déversement est progressivement déplacée de façon que l'épaisseur et le temps de séchage de chaque couche déposée puissent être réglés en vue d'obtenir un matériau ayant la résistance souhaitée. Un drainage sous-jacent est prévu pour accélérer le gain de résistance.

Cette méthode ne se limite pas aux stériles ayant une forte proportion de particules grossières, mais des restrictions s'appliquent également quant à la possibilité de stocker d'importants apports d'eau naturels à l'intérieur de l'endiguement, comme dans le cas des autres méthodes type « plage ».

impoundment. The method is thus employed successfully only where the water inflow to the impoundment is modest in relation to the pond area, such as off-valley disposal sites or valley sites with adequate diversion of the river, and to tailings products having a substantial proportion of coarse particles and relatively high solids content. Notwithstanding the general resulting pattern of coarser material to the outer faces of the impoundment, some layers of finer material are also formed near the outer faces as a result of varying deposition practices and “dead” zones in the beach, giving rise to limitations on the stability of the structure.

Fig. 12

Type F₁. Embankment construction using the «spigot» disposal method

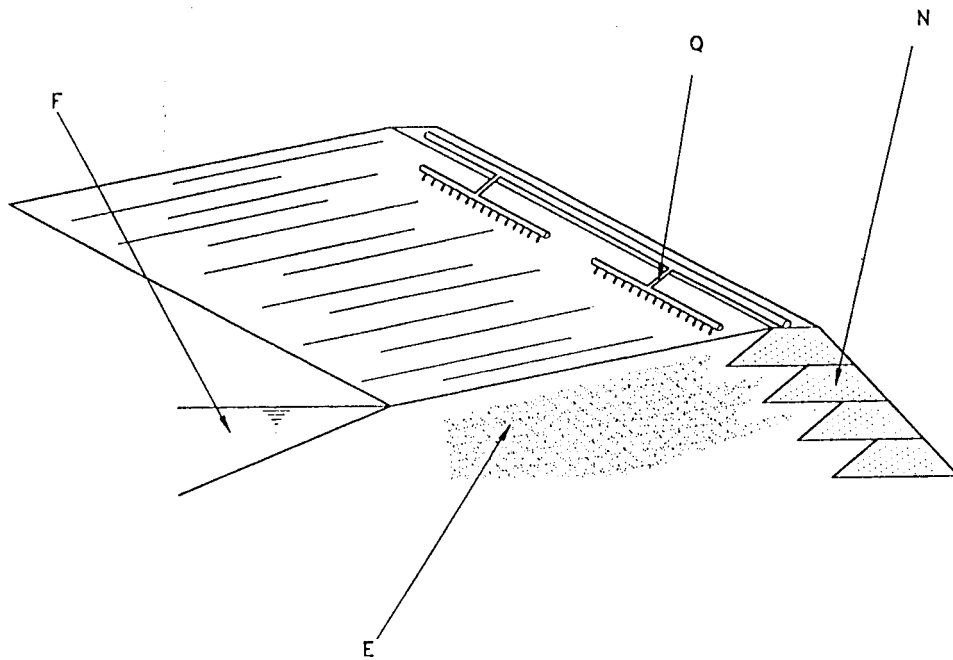
Construction du remblai au moyen de buses de déversement (spigots) - Type F₁

(A) Coarser tailings - Structural zone	(A) <i>Stériles grossiers - Corps du remblai</i>
(B) Filter drain	(B) <i>Filtre-drain</i>
(E) Finer tailings - Impermeable zone	(E) <i>Stériles fins - Zone imperméable</i>
(F) Water in reservoir	(F) <i>Eau dans le réservoir</i>
(G) Current embankment profile	(G) <i>Profil en travers actuel du remblai</i>
(H) Future embankment profile	(H) <i>Profil en travers futur du remblai</i>
(K) Successive tailings pipeline locations	(K) <i>Emplacements successifs de la conduite d'apport des stériles</i>
(M) Spigot feed pipe	(M) <i>Tuyau d'alimentation des buses (spigots)</i>
(N) Bunds constructed of locally borrowed coarse tailings	(N) <i>Petites digues constituées de stériles grossiers prélevés localement</i>

F.2 Sub-aerial disposal method

A more recent development in beachtype deposition methods is termed the ‘sub-aerial’ or ‘thin layer’ system. This method again makes use of the drainage and desiccation of the tailings to achieve strength and involves a high degree of deposition control. The tailings are discharged as for the ‘spigot’ method but a spraybar is used to create a more uniform deposition. This results in a closer simulation of sheet flow over the beach and a steeper beach angle. The deposition is progressively moved so that the depth and drying time of each deposited layer can be controlled to permit the material to gain the required strength. An under-drainage system is provided to accelerate the strength gain by drainage.

The method is not limited to tailings materials having a high proportion of coarser particles but similar limitations apply in respect of the ability of the impoundment to absorb high natural inflow rates, as in the case of other methods of beach disposal.



F.3 Mise en dépôt des stériles au moyen d'enclos (bassins)

Un autre système de déversement contrôlé de la totalité des stériles, en particulier lorsque les éléments grossiers sont déficitaires, nécessite la réalisation d'un enclos (bassin) ou d'un réseau d'enclos pour le stockage des stériles, sur la périphérie de l'endiguement. Cette méthode repose sur le drainage et la dessiccation de la couche mince de stériles, et convient parfaitement aux climats arides. Les enclos sont constitués au moyen de petites digues construites à la main en utilisant des stériles déposés, avec un léger compactage manuel. Les stériles sont déchargés tour à tour dans les bassins, de jour, et l'excès d'eau et de stériles est transféré dans la retenue de stockage. L'épaisseur du dépôt dans chaque bassin est soigneusement contrôlée, et on laisse le drainage et le séchage s'effectuer dans le bassin jusqu'à l'obtention d'une résistance minimale, pendant que les bassins adjacents sont en cours de remplissage. De nuit, la totalité des stériles est déchargée dans la retenue de stockage.

Cette méthode a été utilisée avec succès, pendant plus d'un siècle, dans les exploitations minières classiques situées dans des régions où le climat sec favorise un taux élevé d'évaporation et où les conditions économiques permettent de faire appel à une abondante main-d'œuvre. Les restrictions de la méthode portent sur la limitation de la vitesse de montée du remblai pour s'adapter aux conditions climatiques, et de la capacité disponible pour le stockage d'eau, ce qui conduit à n'utiliser la méthode que pour les sites en dehors de vallée.

Fig. 13

Type F₂. Embankment construction using the «sub-aerial» method

Construction du remblai par la méthode «semi-aérienne» - Type F₂

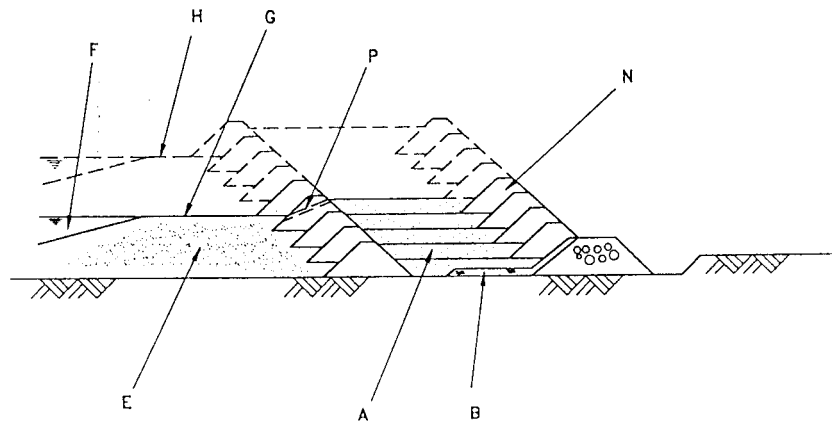
- (E) Deposited tailings
- (F) Water in reservoir
- (N) Bunds constructed of locally borrowed tailings
- (Q) Spray bar discharge

- (E) Stériles déposés*
- (F) Eau dans la retenue*
- (N) Petites digues constituées de stériles prélevés localement*
- (Q) Déversement au moyen d'une rampe d'aspersion*

F.3 Paddock disposal method

Another system employing controlled discharge of the total product, particularly when it is short of coarse material, involves the creation of a series of paddocks of tailings along the line of the dam. This method makes use of both the drainage and desiccation of the thin layer of tailings material, and is very successful in more arid climates. The paddocks are enclosed by low bunds constructed by hand from of the deposited material, with light hand compaction. The tailings material is discharged into them in turn during daylight and the surplus water and tailings are decanted from them into the interior impoundment. The depth of disposal into each paddock is carefully controlled and the paddock then left to drain and dry out until a minimum strength has been achieved, while adjacent paddocks are being filled. At night the total tailings product is discharged into the interior of the impoundment.

This system has been used successfully for over a century in traditional mining areas with dry climates and high evaporation rates and where the economic conditions permit the presence of a large labour force. The limitations on the method include an upper bound on the rate of rise of the embankment to suit climatic conditions and the available water storage capacity, which normally dictates that the method is used only at off-valley sites.



2.2.3. Limites d'application de la méthode amont de construction

1) La plupart des méthodes amont posent de sérieux problèmes de stabilité dans les zones de forte sismicité, à moins que des mesures spéciales ne soient prises, telles que :

- drainage amont au niveau de fondation,
- dispositions permettant de séparer les fines des sables sur une distance définie, à l'amont du barrage,
- talus aval de pente relativement faible.

2) Certaines méthodes amont, telles que la méthode semi-aérienne et la mise en dépôt au moyen d'enclos (bassins), ne sont pas applicables aux grandes exploitations à ciel ouvert où plus de 100 000 tonnes de stériles sont produits par jour. La mise en dépôt au moyen d'enclos ne convient pas aux climats humides.

2.2.4. Dérivation des ruissellements naturels

La dérivation des ruissellements naturels autour d'une zone de dépôt des stériles peut s'avérer nécessaire :

- pour maintenir la revanche nécessaire entre le niveau des plus hautes eaux et la crête du remblai pour les barrages de type A ou B ;
- pour maintenir la revanche nécessaire entre le niveau des plus hautes eaux et la plage de stériles pour les barrages de type D, E ou F, et éviter ainsi de fâcheuses percolations et de fortes pressions interstitielles dans le corps du remblai d'endiguement ;
- pour éviter la contamination des ruissellements naturels par des produits chimiques utilisés lors des opérations minières ou par d'autres substances toxiques présentes dans le dépôt de stériles, et réduire ainsi les coûts de traitement avant l'évacuation de l'eau dans le réseau d'écoulement naturel ;

Fig. 14

Type F₃, Embankment construction using the «paddock» method
Construction du remblai utilisant la méthode des enclos (bassins) - Type F₃

(A) Total tailings product deposited in paddocks forming structural zone	(A) <i>Stériles déchargés dans le bassin pour constituer le corps du remblai</i>
(B) Filter drain	(B) <i>Filtre-drain</i>
(E) Deposited tailings	(E) <i>Stériles mis en dépôt</i>
(F) Water in reservoir	(F) <i>Eau dans le réservoir</i>
(G) Current embankment profile	(G) <i>Profil en travers actuel du remblai</i>
(H) Future embankment profile	(H) <i>Profil en travers futur du remblai</i>
(N) Bunds constructed of locally borrowed tailings	(N) <i>Petites digues constituées de stériles prélevés localement</i>
(P) Decanting arrangement	(P) <i>Dispositif de décantation</i>

2.2.3. Limitations of the upstream method

It should be noted that:

1) Most upstream methods pose serious stability problems in areas of high seismicity, unless special steps are taken which include:

- upstream underdrainage
- means of separating slimes from sands for a specified distance upstream of the dam
- relatively flat downstream slopes.

2) Some upstream methods, such as sub-aerial and paddock deposition, are not applicable to large open pits operations where in excess of 100 000 tons per day of tailings are produced. Paddock deposition is not suitable for wet climates.

2.2.4. Diversion of natural run-off

Diversion of natural run-off around a tailings impoundment may be required:

- to maintain the necessary freeboard between the highest water level and the embankment crest for Type A or B dams;
- to maintain the necessary freeboard between the highest water level and the tailings beach for Types D, E or F dams, thus avoiding untoward seepage patterns and high pore pressures in the structural zone;
- to avoid contamination of the natural run-off with process chemicals or other toxic substances in the impoundment, thus reducing the costs of any treatment required before discharge into the natural water system;

- pour réduire le volume d'eau dans les retenues de stockage où l'on compte sur l'évaporation pour éliminer l'eau en excès plutôt que sur un traitement ou une évacuation ;

- pour satisfaire aux règlements en vigueur dans certains pays.

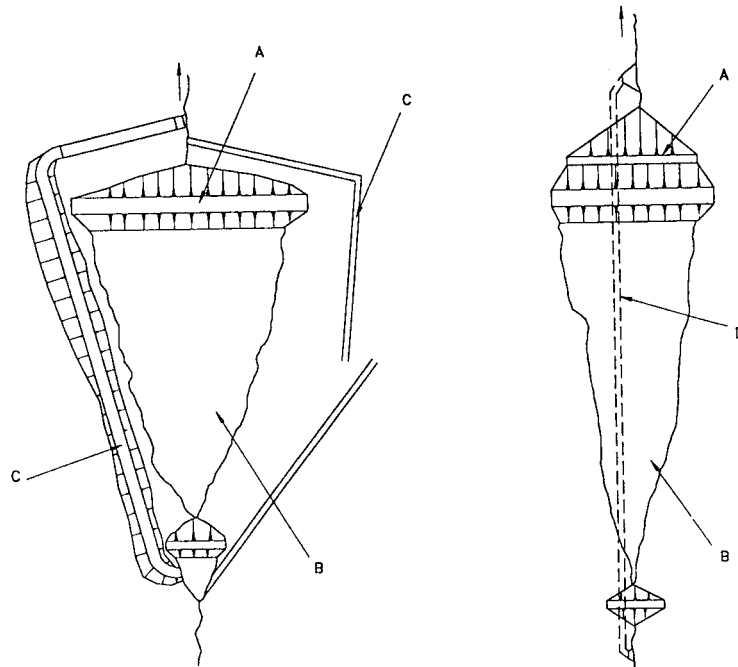
Dans les petits bassins versants, on peut parfois absorber les ruissellements naturels provenant de la vallée ou des versants dominant la retenue de stockage, sans problème majeur. Par contre, dans les grands bassins versants, il est souvent nécessaire ou plus économique de dériver le cours d'eau naturel ou les ruissellements provenant des versants, autour ou sous la zone de dépôt des stériles.

On utilise généralement trois méthodes de dérivation, le choix de la solution dépendant de la topographie du site et des débits d'écoulement prévus :

- aménagement de canaux autour et au-dessus de la périphérie de la retenue de stockage des stériles, ces canaux étant prévus pour une grande variation de débits et étant généralement la solution la plus sûre et la plus économique en terrain relativement plat ;

- pose d'une conduite sous les matériaux mis en dépôt ; cette solution convient aux terrains de forte pente, mais on préfère souvent d'autres solutions en raison des charges élevées appliquées sur la conduite par les stériles mis en dépôt et en raison de conditions difficiles de fondation ;

- construction d'une galerie dans le versant de la retenue de stockage, solution convenant le mieux aux terrains de pente raide présentant un sous-sol rocheux résistant.



I Peripheral Diversion Channels

II Tunnel in Flank or Conduit in Valley

- to reduce the volume of water in those impoundments relying on evaporation to remove excess water rather than treatment and discharge;

- because in some countries it is a statutory requirement.

In small catchment areas it may be possible to absorb the natural runoff from the valley or hill slope above the impoundment without significant impact. Where the catchment area is large, however, it is often necessary or more economical to arrange the diversion of the natural water course or hill-slope run-off, around or under the impoundment.

Three standard methods of diversion are employed, the choice generally being related to site topography and expected flow rates:

- the provision of channels around and above the periphery of the impoundment - channels are able to accommodate a wide range of discharge rates and are usually the most economical and safest solution in relatively flat terrain;

- the provision of a conduit below the deposited material - this may be appropriate to steeper terrains but other solutions are often preferred because the loads imposed on the conduit by the deposited tailings may be large and foundation conditions difficult;

- the provision of a tunnel through the flank of the impoundment - generally the most appropriate solution in steeper terrains where bedrock material on the flank is sound.

Fig. 15

Typical diversion systems
(I) Peripheral diversion channels
(II) Tunnel in flank or conduit in valley

Dispositifs caractéristiques de dérivation
(I) Canaux de dérivation périphériques
(II) Galerie dans le versant ou conduite dans la vallée

(A) Embankment
(B) Tailings reservoir
(C) Channel diversion
(D) Tunnel or conduit diversion

(A) Remblai
(B) Retenue de stockage des stériles
(C) Canal de dérivation
(D) Galerie ou conduite de dérivation

Quel que soit le dispositif adopté, les sites en vallée nécessitent un barrage de dérivation, qui parfois est le remblai d'endiguement amont pour la retenue.

Le système de dérivation joue un rôle important dans la sécurité de l'aménagement de stockage des stériles. Une rupture en tout point de ce système peut entraîner des apports de crue dans la retenue de stockage, pour lesquels celle-ci n'a pas été conçue, et parfois un déversement sur le remblai et sa rupture totale.

La rupture d'une conduite peut également provoquer un entraînement de stériles dans le cours d'eau à l'aval, avec une pollution de grande envergure, de même qu'une érosion interne dans le dépôt de stériles et parfois dans le remblai d'endiguement. [La technique des ouvrages de dérivation occupe donc une place importante dans la conception de l'aménagement.]

2.2.5. Mise en dépôt dans la retenue

Dans certaines installations, en particulier lorsqu'un remblai de type A ou B est utilisé, la mise en dépôt des stériles dans la retenue peut se présenter sous la forme d'un déversement à gueule bée en un seul point. Cependant, une solution plus économique consiste à adopter une mise en dépôt contrôlée, tenant compte des pentes des dépôts de stériles au-dessus et au-dessous de l'eau, ainsi que des diverses densités des matériaux déposés correspondant aux diverses méthodes de mise en dépôt.

Lorsque les stériles sont utilisés dans la construction du remblai d'endiguement (types C à F), les dispositions de mise en dépôt dépendent beaucoup de la méthode de construction du remblai. De toute façon, on peut obtenir des économies substantielles en répartissant judicieusement les points de déversement des stériles et en contrôlant le niveau d'eau.

Le déversement global, en un seul point, de stériles composés de matériaux rocheux finement broyés, avec une teneur en éléments solides variant de 25 à 50 %, conduit généralement à un dépôt de forme conique et aplatie. Les pentes au-dessus de l'eau peuvent varier de 1 : 100 à 1 : 500 environ, en fonction du débit de déversement, de la teneur en éléments solides et de la granulométrie. D'autres matériaux se déposent sous des angles plus ou moins grands, dépendant des propriétés des matériaux. Lorsque les matériaux atteignent l'eau de la retenue, la pente du dépôt sous l'eau tend à devenir plus raide et dépend, en grande partie, de la granulométrie et du degré de floculation des éléments fins. La prise en compte des angles de dépôt permet d'améliorer l'efficacité de la mise en dépôt, exprimée en volume de matériau stocké pour une hauteur donnée de remblai.

L'augmentation de densité des matériaux déposés est accélérée par l'action du drainage et de la dessiccation par évaporation. L'augmentation de densité résultant de la consolidation est en outre accélérée par drainage. Pour ces raisons, la densité et donc le rendement du stockage, exprimé en tonnage stocké dans un volume donné et dans un temps donné, sont améliorés lorsque la mise en dépôt s'effectue sur une plage, en particulier lorsque celle-ci est bien drainée.

Bien que chaque disposition doive être jugée sur ses mérites, les avantages présentés par la mise en dépôt utilisant une plage et permettant d'obtenir des densités plus élevées seront généralement acquis automatiquement si un remblai de

Whatever system is used, valley sites require a diversion dam which may or may not be the upstream confining embankment for the impoundment.

The diversion system is critical to the safety of a tailings disposal system. Failure of any part can lead to the impoundment receiving floods for which it was not designed and possibly to overtopping and total failure of the embankment.

Failure of a conduit can also give rise to uncontrolled discharge of tailings into the water course downstream, leading to widespread pollution, as well as to internal erosion of the tailings deposit and possibly the confining embankment. [The engineering of diversion structures has thus to be given a high priority in planning the facility.]

2.2.5. Deposition in the impoundment

In some applications, particularly where embankment types A and B are employed, the disposal of tailings into the impoundment can take the form of single point open-ended discharge. However, a more controlled deposition system, taking account of the slopes formed by the deposited tailings above and below water and the different densities of the deposited material achieved by different methods of placement can give rise to economic benefits.

Where the tailings product is used in the construction of the embankment, as in embankment types C to F, the disposal arrangements are largely dictated by the embankment construction method. Even with these systems, however, greater economies can be achieved by judicious deployment of deposition points and control of water level.

The bulk discharge of tailings composed of finely ground rock materials at a solids content ranging between 25% to 50% from a single point, generally results in a flat conically shaped deposit. Slopes above the water level may vary from about 1:100 to about 1:500, depending on the throughput rate, solids content and particle size distribution. Other materials settle at flatter or steeper angles as governed by their properties. When the material reaches the supernatant pool the deposition angle under water tends to steepen and is controlled largely by the particle size distribution and by the degree of coagulation which takes place in the finest material. Taking account of the deposition angles can result in greater disposal efficiency in terms of the volume of material which can be stored for a given embankment height.

The increase of density of deposited material is accelerated by the action of drainage and by desiccation caused by evaporation. The scale of increase in density effected by consolidation is additionally accelerated by drainage. For these reasons the density and hence the storage efficiency, in terms of the tonnage which may be stored in a given volume, in a given time, is improved by deposition taking place on a beach, particularly when the beach is well drained.

Although each situation will need to be judged on its merits, the benefits of beach deposition to the achievement of greater densities will generally be experienced automatically if a type F embankment is constructed, particularly where

type F est construit ; cela se présente, en particulier, lorsqu'on utilise la méthode semi-aérienne où la stratégie de mise en dépôt vise spécifiquement à obtenir un dépôt drainé et asséché.

Puisque la pente du dépôt dépend de la teneur en éléments solides du produit déversé, on a pris des dispositions, sur certains sites, pour obtenir un produit déversé de consistance plus épaisse que celle fournie par les dispositifs courants d'épaississement : des teneurs en éléments solides dépassant 60 % ont été obtenues. Cela permet d'augmenter le rendement du stockage exprimé en volume de stériles emmagasiné pour une hauteur donnée de remblai. Sur de tels dépôts, il est nécessaire que les propriétés des matériaux ne changent pas après leur mise en dépôt, afin d'éviter un adoucissement de la pente ou un écoulement des matériaux. De fortes chutes de pluies, par exemple, peuvent provoquer des ruptures de talus.

Dans certains cas (par exemple, lorsque l'oxydation produit des matériaux acides ou toxiques, ou lorsque la nature toxique des stériles conduit à prévenir tout risque de déplacement de poussières), il peut s'avérer nécessaire de déposer tous les stériles sous l'eau. Il faut tenir compte de la tendance de certains stériles à développer une réaction chimique lors de leur exposition à l'air, et de la nécessité d'éviter que les stériles particuliers ne soient transportés vers la zone environnante par l'action du vent. Dans ces conditions, on utilise généralement des conduites flottantes pour acheminer les stériles, et on est parfois amené à déplacer fréquemment le point de déversement étant donné que la pente relativement raide du dépôt sous l'eau peut entraîner une montée rapide des matériaux immédiatement sous le point de déversement.

La plupart des stériles provenant d'exploitations minières, où des roches relativement saines sont soumises à un broyage, ont une forte tendance à flocculer, ce qui conduit à une sédimentation assez rapide. Cependant, d'autres stériles, tels ceux provenant de mines de phosphate, peuvent contenir des matériaux fins très dispersifs, d'où un allongement préjudiciable de la durée de sédimentation. Dans ce cas, on peut utiliser des techniques spéciales, consistant à ajouter des éléments grossiers ou à provoquer artificiellement une floculation, par procédé chimique, à l'usine de traitement ou dans la retenue d'eau.

2.2.6. Évacuation de l'eau de surverse

Tout au long des opérations de mise en dépôt, on doit veiller à maintenir la retenue d'eau aussi faible que possible, comme indiqué dans le précédent sous-chapitre. Deux dispositifs se présentent pour l'évacuation de l'eau : conduite dont le niveau d'évacuation suit la montée progressive du niveau de la retenue de stockage, ou pompe. L'eau est retournée à l'usine d'extraction pour réutilisation et/ou, après traitement, évacuée dans le cours d'eau naturel.

L'ouvrage d'évacuation, appelé généralement « ouvrage de décantation », est habituellement constitué de deux éléments : une prise d'eau extensible et une conduite pour acheminer l'eau au-delà du remblai. La prise d'eau peut être une tour verticale ou un coursier en pente fondé habituellement sur le terrain naturel, à flanc de coteau de la retenue de stockage, ou occasionnellement sur le talus amont du remblai.

the sub-aerial method is used in which the deposition strategy is specifically intended to obtain a drained and desiccated deposit.

Since the angle of deposition is related to the solids content of the tailings, arrangements have been made at some sites for the tailings to be given a greater degree of thickening than is normally achieved by standard thickeners and solids contents of over 60% have been obtained. This enables the storage efficiency in terms of storage volume to embankment height to be substantially increased. It is necessary at such deposits to establish that a change in the material properties will not occur after deposition which could flatten the slope or result in a flow of the material. Heavy rainfall, for example, can cause slope failures.

In some disposal systems (e.g. when oxidation would produce acidic or toxic materials, or if the toxic nature of the tailings made it necessary to prevent migration of dust) it may be required that all the tailings are deposited under water. This may be influenced by the propensity of the tailings to undergo chemical action on exposure to the atmosphere or by the need to avoid the particular tailings being carried to the surrounds by wind action. In these circumstances floating pipelines are normally used to deliver the tailings and frequent movement of the discharge point may be needed since the steeper deposition angle under water may lead to a rapid rise of the deposited material directly under the discharge point.

Most of the tailings products, emanating from mining operations in which relatively unweathered rock is subjected to grinding, have a relatively strong tendency to coagulate and sedimentation is consequently fairly rapid. Other tailings products, however, such as those derived from phosphate mining and manufacturing plants, may contain highly dispersive fine materials and sedimentation is severely protracted. In such circumstances special techniques may be employed, involving the addition of coarser particles or artificially inducing coagulation, through chemical dosing at the process plant or in the supernatant pond.

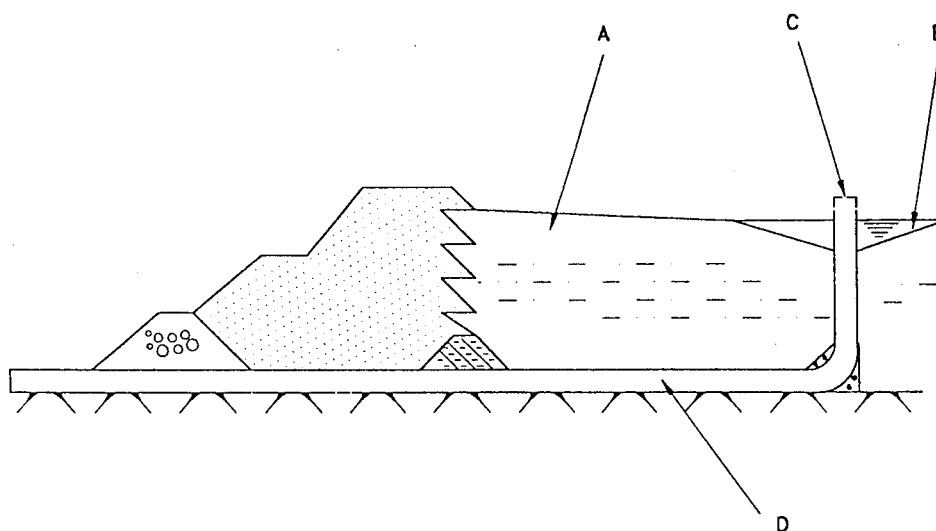
2.2.6. Removal of supernatant fluid

The aim throughout the development of the impoundment is usually to keep the pool of supernatant water as low and as small as possible, as discussed in the preceding subsection. The main requirement for successful removal of the water is the provision of an outlet arrangement, the effective level of which can be adjusted throughout the progressively increasing impoundment level, or of a pump, which can perform a similar function. The water is returned to the extraction plant for re-use and/or, after treatment, discharged into the natural water courses.

The outlet structure, or “decanting system” as it is normally termed, is usually composed of two elements an extendible intake and a conduit to convey the discharge away from the embankment. The intake may take the form of a vertical tower, or a sloping chute founded usually on natural ground on a flank of the impoundment and occasionally on the upstream face of the embankment.

Tour de décantation

Si la hauteur finale du dépôt de stériles est importante, la tour est généralement construite au fur et à mesure de la montée du dépôt, afin d'éviter la réalisation coûteuse d'un ouvrage élancé, sans appui latéral, avant le démarrage des opérations de stockage. La tour peut être une structure en béton armé, comportant des orifices dans la paroi, à intervalles rapprochés sur toute la hauteur. Au fur et à mesure que le niveau des stériles monte, les orifices sont obturés afin d'éviter le passage de stériles. Pour la construction progressive de la tour, nécessitée par la surélévation du seuil de prise d'eau, on peut adopter soit des éléments en acier, soit des éléments en béton armé, fixés au tronçon sous-jacent. La Fig. 16 donne le schéma d'une tour de décantation.



En ce qui concerne la construction de la tour, il importe que les éléments utilisés pour la surélévation progressive du niveau d'évacuation soient légers : plaques d'obturation des orifices ou tampons dans le cas d'une tour construite en une seule étape, tronçons unitaires dans le cas d'une tour exécutée par étapes. En cours d'exploitation, la tour est entourée d'eau et les ouvriers y accèdent habituellement par bateau ou ponton pour les travaux de surélévation.

Les types de tour décrits imposent des limitations sur les débits d'évacuation. On ne peut accepter qu'une hauteur réduite d'eau au-dessus de l'orifice inférieur d'une tour monolithe pour permettre son obturation au cours de la montée du niveau des stériles ; en ce qui concerne une tour surélevée par étapes, son diamètre doit être petit pour faciliter les travaux de construction.

Coursier de décantation

L'ouvrage de décantation type « coursier » est souvent adopté lorsque les versants de la zone de dépôt sont relativement raides et les fondations résistantes. L'avantage de ce dispositif est que l'accès se fait à sec. Des poutres constituant le

The decant tower

If the ultimate depth of the impoundment is substantial the tower structure is normally constructed progressively as the deposition level rises to avoid the costs of a high unsupported structure before the impoundment is commissioned. The tower may be constructed of reinforced concrete as a solid structure with ports through the walls at close spacing throughout the height. As the tailings level rises the ports are sealed progressively to prevent tailings discharge through the system. The tower may alternatively be constructed progressively using steel or reinforced concrete sections bolted in turn on to the sections below as the need arises for the sill to be raised. A typical system of this type is sketched in Fig. 16.

Fig. 16

Tower decanting system

Schéma d'une tour de décantation

(A) Tailings beach
(B) Supernatant pond
(C) Tower
(D) Outlet conduit

(A) *Plage constituée de stériles*
(B) *Retenue d'eau*
(C) *Tour*
(D) *Conduite d'évacuation*

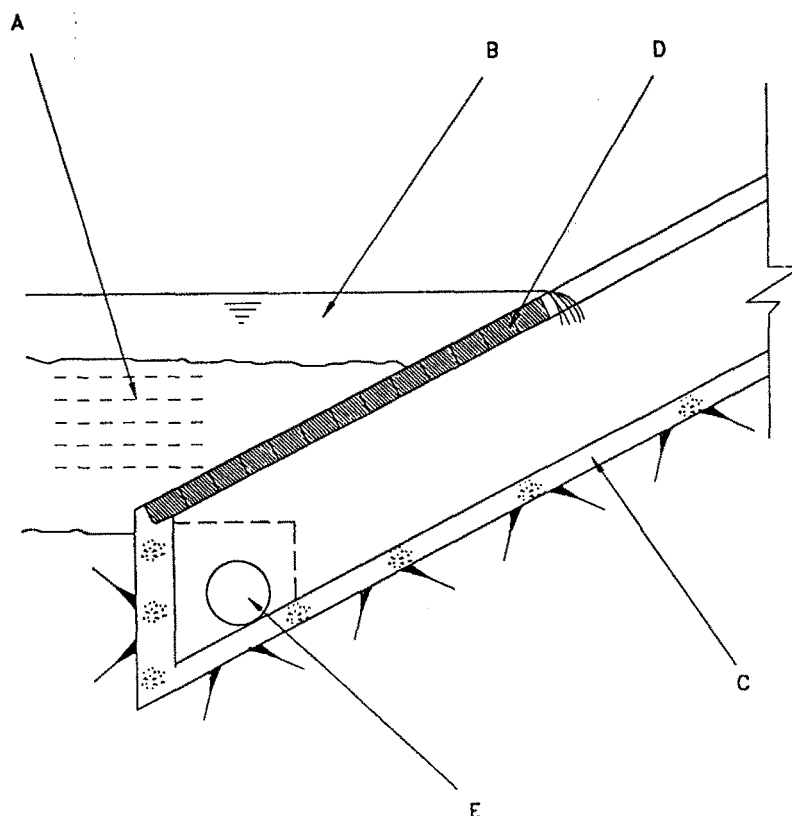
An essential requirement of a tower system is that the units used for the progressive raising of the effective discharge level the sealing plates or bungs for a solid tower or the sections for an extendible tower are light in construction. During operation the tower is surrounded by water and access has to be gained by the operatives usually by boat or pontoon for frequent raising.

The types of towers described impose limitations on the outflow discharge rates which can be accommodated. Only a limited height of water can be accepted over the lowest port in a solid tower to permit closure as the tailings level rises; the annulus diameter in a progressively raised tower needs to be small to facilitate handling and placement.

The decant chute

The sloping chute type of structure is often used where the flanks of the depository are relatively steep and the foundation conditions sound. The advantage of the arrangement is that access can be achieved on dry land. Weir boards are pro-

seuil de déversement sont progressivement ajoutées à la partie supérieure du coursier pour contrôler le niveau d'eau et empêcher l'entrée de stériles (Fig. 17).



Les ruptures des ouvrages de décantation ont été l'une des causes principales des ruptures ou des mauvais comportements des barrages de stériles ; la conception de ces ouvrages exige donc des techniques très éprouvées. Les dispositions adoptées doivent être telles que la surélévation du niveau d'évacuation, susceptible d'être réalisée par des ouvriers non qualifiés, soit une opération sans difficultés, à l'épreuve des erreurs. Il est souvent judicieux de limiter la hauteur de fonctionnement de l'ouvrage de décantation et de construire une série d'ouvrages sur le versant de la retenue de stockage, plutôt qu'un ouvrage unique capable de fonctionner sur toute la hauteur de la retenue.

Dispositifs de pompage

L'utilisation de barges de pompage pour évacuer l'eau présente une grande sécurité et une grande souplesse, leur emplacement pouvant être changé pour s'adapter à la configuration du dépôt et de la retenue d'eau. Des détails sont donnés au paragraphe 4.2.4. La Fig. 18 donne un schéma d'un dispositif de pompage.

gressively added to the open upper section of the chute to perform the function of controlling the water level and preventing the ingress of tailings, as illustrated in Fig.17.



Fig. 17

Chute decanting system

Schéma d'un coursier de décantation

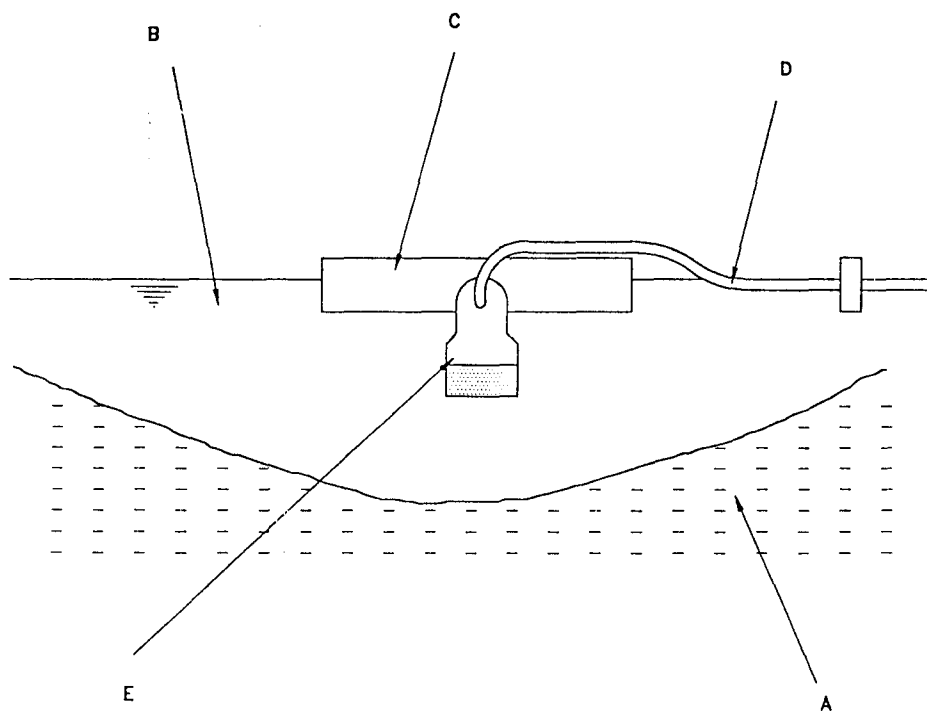
(A) Settled tailings
(B) Supernatant pond
(C) Chute structure
(D) Weirboards
(E) Outlet conduit

(A) *Stériles après sédimentation*
(B) *Retenue d'eau*
(C) *Coursier*
(D) *Poutres du seuil*
(E) *Conduite d'évacuation*

Decanting system failures have accounted for a large proportion of the failures or unsatisfactory performances of tailings impoundments and a high level of engineering is required in their design. The arrangement has to be such that the raising of the effective level of discharge, which may be undertaken by unqualified operatives, is a straightforward and relatively error-proof operation. It may frequently be appropriate to limit the height of operation of a decanting system and to construct a series of systems up the flank of the impoundment rather than a single system capable of operation over the full height of the impoundment.

Pumped decant

The use of pump barges for water removal makes for greater safety and provides flexibility during operation in that its location may be altered to suit the current deposition pattern and location of the pond of supernatant water. Further details are given in Section 4.2.4. A typical arrangement is sketched in Fig.18.



Un important facteur dans le projet d'une retenue de stockage de stériles est l'emplacement de l'ouvrage de décantation ou de la pompe par rapport au remblai d'endiguement. Si la partie basse de la plage de stériles est utilisée comme la seule zone moins perméable d'un remblai, comme c'est le cas dans les remblais types D à F, l'accroissement de la distance entre le remblai et l'ouvrage de décantation ou la pompe augmente la revanche et donc la capacité du réservoir à absorber des crues. Cependant, lorsqu'un ouvrage de décantation évacue l'eau à l'aval du remblai, le coût augmente avec la distance de l'ouvrage de sortie par rapport au remblai. Les bénéfices résultant d'une augmentation de la capacité d'amortissement des crues doivent donc être comparés au coût entraîné par un conduit de décantation plus long.

2.2.7. Maîtrise de la pollution

Les principales causes de pollution résultant de la mise en dépôt des stériles sont : dispersion de particules de stériles dans la zone environnante, apport d'eau polluée dans la nappe phréatique ou dans le cours d'eau naturel, émission de gaz toxiques dans l'atmosphère. Une attention particulière sera portée à la géochimie des matériaux devant être stockés.

a) Particules solides

Des particules solides peuvent être dispersées par suite de l'érosion des surfaces du dépôt par l'eau ou le vent, et être transportés par l'eau décantée ou l'écou-

Fig. 18

Pump barge

Barge de pompage

- (A) Settled tailings
- (B) Supernatant pond
- (C) Floating platform
- (D) Floating outlet pipe
- (E) Submersible pump

- (A) *Stériles après sédimentation*
- (B) *Retenue d'eau*
- (C) *Plate-forme flottante*
- (D) *Conduite d'évacuation flottante*
- (E) *Pompe submersible*

An important factor in the design of the impoundment is the siting of the decanting outlet or pump in relation to the embankment. If the lower part of a tailings beach is used as the sole less permeable zone of an embankment, as in embankment types D to F, then increasing the distance between the embankment and the decanting outlet or pump, increases the freeboard provided and hence the capacity of the reservoir to absorb floods. Where a decanting discharges downstream of the embankment, however, the cost increases with the distance of the outlet from the embankment. The benefits of increased flood dissipation capability have thus to be set against the cost implications of a longer decanting conduit.

2.2.7. Pollution control

The main causes of pollution from tailings depositories are the dispersal of solid particles of tailings to the surrounds, the seepage or flow of polluted water into the ground water or into natural water courses and the discharge of toxic gases into the atmosphere. Particular attention should be given to the geo-chemistry of the materials to be stored.

a) Solids

Solid particles may be dispersed by water or wind erosion of the surfaces of the impoundment, removal with the decanted water or outflow as a result of failu-

lement provoqué par une rupture de l'ouvrage de décantation ou des talus du remblai d'endiguement. On peut prévenir les risques liés à la rupture des ouvrages de décantation ou des talus du remblai au moyen d'une parfaite conception de ces ouvrages, et ceux liés à l'évacuation d'eau au moyen d'une surveillance en cours d'exploitation. La prévention des risques associés à l'érosion par l'eau ou le vent peut, toutefois, nécessiter des dispositions spéciales.

Les stériles miniers et industriels sont particulièrement sujets à érosion, compte tenu de leur structure granulaire, avec une grande proportion d'éléments des catégories « silt » et « sable » et l'absence « d'argile ». Lors d'orages, le ruissellement sur les talus du dépôt entraînera rapidement des éléments si la protection est insuffisante. On peut prévenir une telle érosion en recouvrant les talus du dépôt d'une couche de protection : couche de gravier ou de terre engazonnée, tapis de géotextile et d'herbe, revêtement synthétique. D'autres méthodes consistent à imprégner la surface des stériles avec un produit chimique qui assure une protection hydrophobe ou une liaison des particules de stériles (par exemple, composé de silice, ciment, bitume ou bentonite). Sur d'autres dépôts, les propriétés chimiques des stériles, tels ceux contenant des pyrites ou des sulfures, peuvent contribuer à la liaison des particules.

L'érosion par le vent affecte spécialement la crête du remblai, mais parfois également les talus de l'endiguement et la surface des plages. Pour faire face à cette érosion, on peut traiter la crête et les talus du remblai comme dans le cas de l'érosion par l'eau ; mais on doit appliquer un traitement spécial de surface à l'intérieur de la retenue de stockage : brise-vent, aspersion d'eau, application d'un liant chimique. Comme exemple, on peut indiquer qu'une émulsion bitumineuse a été pulvérisée sur les plages et les crêtes de barrage par un hélicoptère volant à basse altitude. Dans des cas exceptionnels, on peut être amené à déposer les stériles sous l'eau. Une végétation en surface, flottante ou sur des zones inactives, peut être efficace.

b) Eau

La fuite d'eau polluée de la retenue de stockage est souvent le problème le plus important à résoudre. Cette eau peut provenir de trois sources : eau évacuée par l'ouvrage de décantation, percolation à travers le remblai, alimentation de la nappe phréatique par de l'eau provenant de la retenue de stockage.

Si l'on ne peut évacuer directement dans le cours d'eau naturel l'eau de surverse de la retenue, il sera nécessaire de prendre des mesures de façon que toute l'eau soit retournée à l'usine ou, dans les climats chauds et très arides, évaporée. L'eau décantée peut être stockée au moyen d'un barrage de récupération situé à l'aval de la zone de dépôt afin de la traiter avant son évacuation dans le cours d'eau naturel.

Le captage des percolations par pompage est une solution permettant de maîtriser la pollution de la nappe phréatique, à condition de prendre en considération la période suivant la fermeture de la retenue de stockage. La nécessité du pompage sera réexaminée dans le programme de réhabilitation et de fermeture. Il sera fait mention du problème de la pollution de la nappe phréatique, discuté au chapitre 5.3.8., et du résumé des mesures de contrôle de cette pollution destinées à la prévenir ou l'atténuer (Tableau 3).

re of the decanting system or of the slopes of the impoundment. Of these possible occurrences those associated with failure of the decanting system or impoundment slopes are prevented by adequate design of those structures and those associated with the removal of the water are prevented by operational control. The prevention of those associated with water or wind erosion, however, may require special provisions.

Tailings products are particularly prone to erosion, being usually particulate in character and having a large proportion of silt-sized and sand-sized particles and an absence of clay. Storm runoff on the slopes of the impoundment will quickly pick up the particles if there is inadequate protection. Prevention may be effected by covering the sloping surfaces of the impoundment with a protective layer, such as gravel, a soil and grass cover, geofabric and grass cover or some form of synthetic coating. Other methods used have included the impregnation of the surface layer of the tailings with a chemical which will repel water or result in particle binding such as a silica compound, cement, bitumen or bentonite. At some impoundments the chemical properties of the tailings, such as those containing pyrite or sulphides, may assist particle binding.

Wind erosion affects particularly the crest of the embankment but may also pick up material from the slopes of the impoundment or from the surface of the beaches. For prevention, the embankment crest and slopes may be treated as for water erosion but the surface within the impoundment may need special treatment, such as the provision of wind breaks, operational water spraying or the application of a binding chemical. As an example, a bituminous emulsion has been sprayed on to beaches and dam crests by low flying helicopter. In extreme cases it may be necessary for the tailings to be deposited under water. Surface vegetation, either floating or on inactive areas, can be effective.

b) Water

The escape of polluted water from the impoundment is often the most important problem to be overcome. The water may emanate from any of three sources discharge through the decanting system, seepage through the embankment and seepage from the impoundment into the ground water.

If the supernatant water in the impoundment may not be discharged directly into the natural water courses, it will be necessary either to arrange the deposition such that all supernatant water is either returned to the plant or, in very arid, hot climates, evaporated. The decanted water may be stored by a reclaim dam downstream of the impoundment and treated before discharge into the natural water course.

Seepage capture by pumping is an option for control of pollution in ground water, provided that it is recognised that there may be an ongoing commitment after the tailings impoundment is closed. The necessity for pumping after closure should be reviewed in the rehabilitation and closure plan. Reference should be made to the problem of groundwater pollution discussed in section 5.3.8, and the summary of seepage control measures to prevent or mitigate groundwater pollution given by Table 3.

c) Gaz

L'émission de gaz, tel que le radon dans les exploitations d'uranium, est généralement limitée en déposant les stériles sous l'eau et en maintenant continuellement de l'eau au-dessus des matériaux mis en dépôt. D'autres techniques de mise en décharge, telle que la méthode semi-aérienne, peuvent également être adoptées pour maintenir les émissions de gaz dans des limites acceptables, la mise en œuvre de ces techniques nécessitant un contrôle suivi.

Le gaz susceptible d'être dissous dans l'eau peut être libéré lorsque l'eau est évacuée par les ouvrages de décantation. Mais des mesures, essentiellement effectuées en Suède, ont montré que les quantités étaient généralement faibles et inférieures aux limites admises. Les stériles provenant des mines d'or peuvent générer des gaz de cyanure s'échappant de la retenue d'eau. Des dispositions doivent être prises afin d'éviter les impacts sur l'homme et la faune, y compris les oiseaux.

c) Gas

Gas emissions from the tailings, such as that of radon from uranium tailings, are normally limited by the deposition of the tailings under water and the retention at all times of water over the deposited material. With careful control, however, other disposal arrangements, such as the sub-aerial method, may be programmed to keep gas emissions within acceptable limits.

Gas which may have dissolved in the water, can be liberated as water discharges through decant systems, but measurements, made mainly in Sweden, have shown that amounts are usually small and within accepted guidelines. Tailings from gold mining may generate cyanide gas, released from the supernatant water. Provision needs to be made to avoid impact on humans and wildlife, including birds.

3. CONCEPTION DES BARRAGES DE STÉRILES

3.1. GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre porte sur la conception des barrages de stériles et ne s'étend pas à la conception de l'ensemble de la retenue de stockage, bien que toutes deux soient étroitement liées à bien des égards. La conception doit tenir compte de la longue vie prévue pour l'ouvrage, comprenant les périodes au cours desquelles il est peu probable que les dispositifs d'entretien et d'auscultation devront encore être en place.

Comme indiqué dans le chapitre 2, les barrages peuvent être construits sur à peu près n'importe quel site, en utilisant une grande variété de matériaux : remblai d'emprunt, terrain de couverture/divers résidus industriels, déchets d'enrochement, les stériles eux-mêmes et diverses combinaisons. Quelle que soit la combinaison de remblai adoptée, les barrages doivent être conçus, comme tous les barrages en remblai, suivant des critères géotechniques éprouvés afin d'assurer la sécurité et un entretien minimal des ouvrages.

Un avantage inhérent à la conception et à la construction des barrages de stériles, et rarement offert aux projeteurs de digues en remblai à retenue d'eau, est que la construction des premiers est relativement lente et qu'il est possible d'adapter la méthode de conception « chemin faisant ». Les programmes miniers et industriels changent souvent, ce qui conduit à modifier la conception initiale des barrages de stériles au cours de la construction. La hauteur maximale du barrage prévue à l'origine sera souvent dépassée pour répondre à une augmentation du volume de stériles à stocker.

3.2. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION

La législation concernant le contrôle des retenues d'eau en Grande-Bretagne exige que la responsabilité de la conception et du contrôle général des travaux de construction incombe à un ingénieur compétent. La qualification d'un ingénieur susceptible de prendre une telle responsabilité fait l'objet d'un examen professionnel rigoureux. Les candidats admis sont désignés pour une période de cinq ans, le renouvellement de leur contrat faisant l'objet d'une décision ultérieure. En outre, le contrôle continu de l'exploitation des barrages est confié à des ingénieurs qualifiés spécialement choisis pour cette tâche.

Bien qu'il n'y ait pas, dans le monde, de législation ayant de telles clauses rigoureuses, il y a beaucoup de choses à dire sur son application aux barrages de

3. DESIGN CONSIDERATIONS

3.1. GENERAL

This Chapter considers the design of dams and does not extend to the design of the whole impoundment, although the two are interrelated in many ways. The design should take into consideration the expected long life of the structure, including periods when the maintenance and monitoring systems are unlikely still to be present.

As stated in Chapter 2, the dams may be built on almost any site, from a wide variety of materials including borrowed fill, waste overburden/various wastes from industry, waste rockfill, the tailings themselves and various combinations. Whatever the combination of types of fill that are used, for safety and minimum maintenance, dams must be designed, as are all embankment dams, to sound geotechnical principles.

An advantage inherent in the design and construction of tailings dams that is seldom afforded to designers of water retaining embankment dams is that most are built slowly and it is possible to use a design-as-you-go approach. Initial mining or industrial programmes frequently change so initial designs of dams usually have to be modified as construction proceeds. Often the original planned maximum height of the dam will be exceeded as the requirement for increasing storage volume continues.

3.2. DESIGN AND CONSTRUCTION RECOMMENDATIONS

Legislation controlling water reservoirs in Britain requires design and supervision of construction to be the responsibility of one competent engineer. The competence of an engineer wishing to take this responsibility is assessed by a severe professional review. Successful candidates are appointed for a five year period, before being required to renew their application. In addition, the operation of dams has to be supervised continuously by competent engineers specially chosen for this task.

Although there is no legislation in the world that has such strict provisions, there is much to be said for its application to tailings dams. It is in the interests of

stériles. Il est de l'intérêt du maître d'ouvrage d'employer un ingénieur compétent pour la conception de ses barrages de stériles et pour le contrôle satisfaisant de leur construction.

3.3. RECONNAISSANCES DU SITE

Le choix du site dépend généralement de l'emplacement et du type de l'usine ou de la mine à laquelle doit servir la retenue de stockage. La topographie déterminera la situation et la hauteur maximale possible du barrage. Les aspects environnementaux relatifs à la toxicité éventuelle des stériles stockés permettront de préciser l'étendue des reconnaissances nécessaires sur le site. Les recommandations relatives aux reconnaissances sont nombreuses [Clayton et al., (1982)]. Un programme type peut être le suivant :

a) Étude préliminaire au bureau. Elle comprend l'étude : de cartes avec lignes de niveau, indiquant les maisons d'habitation, les installations et les rivières ; de cartes géologiques montrant les couches et les travaux souterrains ; des informations sur les sondages existants et/ou des enregistrements effectués dans des puits ; des informations sur l'hydrologie et la sismicité.

b) Interprétation de photographies aériennes, en particulier si l'on ne dispose pas de cartes avec lignes de niveau, en vue d'identifier les lignes d'affleurements, les zones instables (glissements de terrain), les zones de dissolution, etc.

c) Obtention de renseignements sur l'utilisation de l'eau et le climat.

d) Prospection sur le site pour examiner et confirmer les particularités mises en évidence par les études au bureau et par l'interprétation des photos aériennes.

e) Reconnaissances préliminaires du sous-sol. Des tubes piézométriques seront installés dans des forages pour l'observation de la nappe phréatique et pour des prélèvements d'eau à des fins d'analyse chimique.

f) Classification des sols par description et à partir d'essais sur échantillons.

g) Reconnaissances détaillées du sous-sol avec prélèvement d'échantillons et essais in situ. Des tubes piézométriques seront installés dans des forages de reconnaissance à l'aval de la zone d'implantation du barrage. Le projeteur pourra demander l'installation de quelques tubes piézométriques dans la zone de fondation du barrage, les lectures de ces tubes pouvant se faire à distance. Des piézomètres pourront être utilisés pour mesurer les perméabilités.

h) Essais en laboratoire sur des échantillons non remaniés, de grandes dimensions.

i) Évaluation des données.

L'interprétation des résultats des sondages, en vue d'établir un modèle tridimensionnel du sol, peut être facilitée en utilisant un logiciel.

Au cours de l'étape de projet, les résultats seront utilisés pour le barrage et la retenue de stockage. Au début des travaux de construction, l'ingénieur géotechnicien responsable des reconnaissances du site collaborera étroitement avec l'ingé-

the owner to employ a competent engineer for the design of his tailings dams and to ensure that their construction is satisfactorily supervised.

3.3. SITE INVESTIGATION

The choice of site is usually controlled by the position and type of industry or mine the impoundment is to serve. The topography will control the positions and possible maximum required heights for retaining dams. Environmental considerations relating to the tailings impoundment will be revealed through a systematic environmental base line study. Site investigation for geotechnical purposes will also have to be extensive. A typical sequence of events [e.g. see Clayton et al (1982)] might be as follows:

a) Preliminary desk study. This should include study of contoured maps showing dwellings, installations and streams; geological maps showing strata and underground workings; any existing borehole information and/or well records; information on hydrology and seismicity.

b) Possible air photograph interpretation, particularly if contoured maps are not available, for the purpose of identifying spring lines, unstable areas (land-slides), dissolution features etc.

c) Obtain information on water usage and climate.

d) Site walkover survey to investigate and confirm features noted from the desk study and air photography interpretation.

e) Preliminary subsurface exploration. Standpipe piezometers installed and sealed into completed boreholes to record water table and to enable water samples to be taken for chemical analysis.

f) Soil classification by description and sample testing.

g) Detailed subsurface exploration with sampling and field tests. Standpipe piezometers should be installed in exploratory boreholes downstream of the dam area. The designer may require some to be installed under the dam area that can be converted to remote reading. Piezometers can be used to measure permeability.

h) Laboratory testing of undisturbed and bulk samples.

i) Evaluation of data.

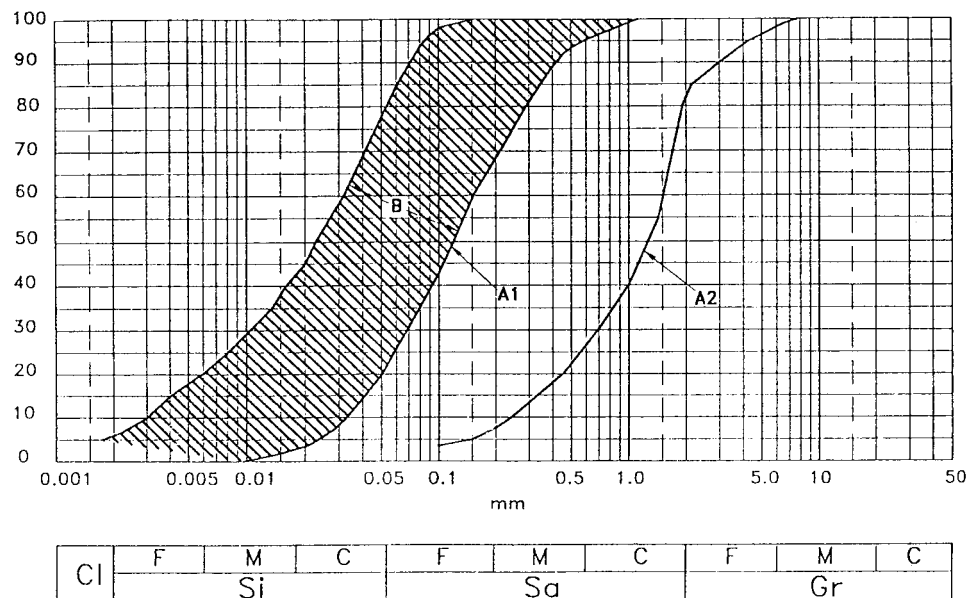
The interpretation of borehole findings, to produce a three dimensional model of the ground, can be computer assisted by a suitable software programme.

The results would be used during the design stage for the impoundment and dams. During the early stage of construction, the geotechnical engineer responsible for site investigation would liaise closely with the design engineer and exa-

nieur de projet et examinera le sol décapé et les excavations pour constater toutes différences éventuelles par rapport aux conditions établies à partir des reconnaissances.

3.4. MATÉRIAUX MIS EN DÉPÔT

Les matériaux devant être stockés peuvent comprendre des solutions chimiques, parfois chaudes (voir chapitre 4.1.2), et d'autres liquides, bien que les stériles dont il est question dans le présent Guide soient acheminés sous forme de boue, la nature du matériau étant donc généralement limitée aux éléments solides transportables économiquement dans l'eau. La Fig. 19 présente des courbes granulométriques caractéristiques de stériles mis en dépôt, la dimension maximale de particule se situant dans la catégorie « sable moyen à grossier ».



On doit cependant noter que, lors de la mise au point des dispositions de mise en dépôt de stériles, il arrive qu'on ne porte pas une attention suffisante au choix du site, aux caractéristiques des matériaux de construction et aux conditions de fondation ; le projecteur sera souvent obligé de rechercher la solution la plus économique, compatible avec les conditions de sécurité et d'environnement, en utilisant les matériaux, la topographie et le climat existants.

Une grande partie des stériles devant être mis en décharge provient d'exploitations minières et du traitement de roches relativement inaltérées. Dans les mines d'or, de cuivre, d'étain, de plomb, de zinc et d'argent, les stériles qui globalement représentent une très grande proportion de la production mondiale de stériles rentrent généralement dans cette catégorie. Les stériles provenant de ces exploitations

mine stripped ground and excavations to record any variations from the conditions predicted by the site investigation.

3.4. MATERIAL FOR DISPOSAL

The materials to be stored can include chemical solutions which may be hot (see section 4.1.2) and other liquids, although the main tailings product under consideration in this Guide is delivered as a slurry and the nature of the material is thus generally limited to particulate solids which are economically transported in water. A typical particle size distribution of tailings normally requiring disposal is shown on Fig. 19, with maximum particle size in the medium to coarse sand classification.

Fig. 19

Particle size distribution curves for tailings

Courbes granulométriques de stériles

Cl - Clay	<i>Cl - Argile</i>
Si - Silt	<i>Si - Silt</i>
Sa - Sand	<i>Sa - Sable</i>
Gr - Gravel	<i>Gr - Gravier</i>
F - Fine	<i>F - Fin</i>
M - Medium	<i>M - Moyen</i>
C - Coarse	<i>C - Grossier</i>
A1 - Normal upper limit	<i>A1 - Limite supérieure normale</i>
A2 - Exceptional upper limit	<i>A2 - Limite supérieure exceptionnelle</i>
B - Normal envelope	<i>B - Enveloppe normale</i>

It must be noted, however, that in the development of a tailings disposal scheme, the luxury of choice of site, construction materials and foundation conditions may not be present; the designer will frequently be required to prepare a scheme to produce the most cost effective solution commensurate with safety and environmental conditions, using only the materials, topography and climate available.

A large proportion of tailings products for disposal result from the mining and processing of relatively unweathered rock. Tailings from gold, copper, primary tin, lead, zinc and silver mining, which collectively constitute a dominant proportion of the total world production of tailings, are normally in this category. The total product from these operations has a reasonably consistent grading curve shape and

ont des courbes granulométriques relativement uniformes se situant dans l'enveloppe indiquée dans la Fig. 19 ; la granulométrie fine ou grossière d'un produit particulier dépend du niveau de broyage adopté à l'usine. On peut noter que la fraction fine correspond à la catégorie « silt » plutôt qu'à la catégorie « argile », ce qui donne au produit les caractéristiques principales d'un silt. Les éléments provenant de roche inaltérée présentent, après broyage, une forme généralement angulaire ou semi-angulaire.

Lorsque la roche mère du minerai est altérée, comme par exemple les matériaux recouvrant les dépôts de porphyre, une forte proportion de fines peut être constituée d'éléments d'argile, c'est-à-dire inférieurs à 0,002 mm. Dans ce cas, le matériau, lors de la mise en dépôt, peut avoir des propriétés identiques à celles de l'argile, qui déterminent son comportement. Le matériau finement broyé provenant d'une roche plus altérée contient une proportion plus élevée de particules de forme semi-arrondie à semi-angulaire, mais les surfaces peuvent être piquées et irrégulières.

Lorsque les minerais sont extraits de dépôts alluviaux ou de plages, il n'y a souvent aucun broyage et la granulométrie dépend de celle de la gangue. Les éléments grossiers peuvent avoir une forme arrondie et les éléments rentrent dans la catégorie « argile » ou « silt », selon l'origine du matériau. En général, la limite supérieure de la courbe granulométrique suivra celle figurant sur le graphique précité ; cependant, dans certaines exploitations minières (par exemple, exploitation de dépôts secondaires d'étain), des particules beaucoup plus grosses existent dans le matériau traité à l'usine et les résidus peuvent présenter une plus grande limite supérieure dans la catégorie grossière.

Dans certaines techniques d'extraction, le matériau peut être trié et les stériles évacués à la décharge de manière fractionnée. Cela se pratique, en particulier, lorsque le matériau est altéré ou constitué de dépôts secondaires ; une installation de triage permet de séparer les matériaux fins correspondant aux catégories silt et argile, le minerai étant seulement extrait de la fraction grossière. Les résidus fins sont souvent appelés « schlamm » ou « boue » (slime) et les résidus grossiers « stériles » (tailings). (Toutefois, dans beaucoup de mines métallifères, le terme « slime » est adopté pour désigner la totalité des résidus). Parfois, le triage du produit a lieu après l'extraction en vue d'obtenir un matériau susceptible d'être utilisé dans l'exploitation minière (par exemple, remblayage des souterrains d'abattage).

Les stériles provenant d'exploitations minières et d'abattages en carrières sont constitués généralement de particules de roche et de sol, et le matériau obéira aux lois de la mécanique des sols dans de nombreux domaines. Toutefois, si les résidus émanent d'un processus de transformation, leur composition peut être différente. Par exemple, le matériau peut présenter une structure non granulaire et son comportement revêtira diverses formes. Alors que les propriétés des stériles miniers peuvent être estimées avec une précision acceptable à partir des données concernant la géologie, la minéralogie et le procédé de traitement, celles des stériles provenant des industries de transformation sont parfois estimées de façon approximative. Les cendres volantes résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques se situent généralement dans la catégorie granulométrique des silts, mais présentent habituellement un niveau inférieur de densités des parti-

normally lies within the envelope shown, the coarseness or fineness of the particular product being related to the degree of grinding applied in the plant mill. It may be noted that the finer fractions of the product lie in the silt size category, rather than the clay size, giving to the product the principal characteristics of a silt. The particles from unweathered rock after grinding are generally angular to sub-angular in shape.

Where the host rock of the mineral is more extensively weathered, as for example in the capping material of porphyritic deposits, a larger proportion of the fines may be composed of clay particles, i.e. smaller than 0.002 mm. If the clay proportion is high the material, on deposition, may exhibit clay-like properties, which may dominate the material behaviour. Finely ground material from more weathered rock may contain a higher proportion of sub-rounded to sub-angular particles but the surfaces of the particles may be pitted and irregular.

Where minerals are extracted from alluvial or beach deposits, there may be no grinding involved and the particle size distribution will be governed by that of the host material. The coarser particles may be rounded and the finer particles may be clay or silt, according to the origin of the material. In general the upper bound of the particle size distribution curve will follow that shown in the diagram but in some mining activities, such as the exploitation of secondary tin deposits, considerably larger particles are included in the material processed in the plant and the resulting tailings may have a coarser upper bound.

In some extraction processes the material may be sorted and discharged to waste as separate tailings fractions. This is particularly common where the host material is weathered or composed of secondary deposits and sorting is used to remove the fine silt and clay materials, the mineral being extracted only from the coarser particles. The fine discard is then often described as "slime" and the coarser discard as "tailings". (In many metalliferous mines, however, the term "slime" is used to describe the total tailings product.) Alternatively the sorting of the product may take place after the extraction process for the derivation of a product which may be useful to the mining operation, such as the coarse fraction for underground stope filling.

The tailings product from mining and quarrying operations is generally composed of natural rock and soil particles and the properties of the material may in many respects conform with the principles of soil mechanics. Where the waste material emanates from a manufacturing process, however, its composition may be quite different. It may, for example, not be particulate in the normal sense and its behaviour may follow correspondingly different patterns. Whereas the properties of mining tailings may be predicted with reasonable accuracy from a knowledge of the geological, mineralogical and processing background, those from manufacturing processes may need to be determined from scratch. Pulverised fuel ash (pfa) that results from burning powered coal in power stations, generally lies in the silt size range, but usually exhibits a lower range of particle densities and contains some cenospheres which are lighter than water. These particles, also of silt size,

cules et contiennent quelques céosphères plus légères que l'eau. Ces particules, de la dimension des silts, sont des sphères creuses comme des billes de verre (matériau produit dans des fours à haute température) et sont recherchées par de nombreuses industries en tant que poudres et fillers non irritants. Les céosphères peuvent poser des problèmes particuliers de projet et d'exploitation, comme on le verra ci-après.

La densité des particules de stériles dépend de la nature de la roche mère dans le cas des exploitations minières. Dans la plupart des cas, le gros du matériau provient de quartz et de feldspath, et la densité des particules varie de 2,6 à 2,7. Lorsque, pour des raisons économiques ou technologiques, seule une partie du minerai est extraite, la densité des particules des stériles reflète la présence du minerai. Par exemple, dans les exploitations minières de fer et de charbon, la densité des particules peut être respectivement supérieure à 4,0 et inférieure à 2,0. Les densités des particules des stériles provenant des usines de transformation peuvent présenter une grande plage de variation et la densité devra être déterminée spécifiquement pour chaque usine.

Le fluide associé aux stériles destinés à être mis en dépôt est généralement de l'eau d'origine terrestre, bien qu'on utilise parfois de l'eau de mer. Dans quelques usines de transformation, en général de petites dimensions, d'autres fluides peuvent être utilisés. La nature et la quantité de matériaux solides dissous dans l'eau, qui déterminent ses propriétés, dépendront de son origine et de la technique d'extraction utilisée. Ces propriétés, ainsi que l'effet du contact continu de l'eau avec les éléments solides, sont d'importants facteurs intervenant dans l'étude des mesures préventives contre la pollution de l'environnement. Le pH de l'eau varie : par exemple, dans un milieu acide constitué de dépôts alluviaux organiques, il peut être ≤ 4 ; dans un milieu alcalin résultant de l'adjonction de chaux pendant ou après l'opération d'extraction, il peut être ≥ 10 .

Le rapport solides/eau varie suivant la technique minière, la méthode d'extraction du minerai et le budget prévu pour le poste « eau ». Dans les exploitations minières alluviales, le pourcentage des éléments solides par rapport à la boue totale peut être ≤ 10 % (en poids) ; lorsque l'exploitation de la mine se fait à sec et que la flottation est utilisée pour l'extraction (comme c'est souvent le cas dans les mines d'or et de cuivre), ce pourcentage peut être de l'ordre de 25 % ; lorsqu'on récupère une partie de l'eau avant d'acheminer les stériles à la zone de dépôt, ce pourcentage peut atteindre 50-55 % ; lorsqu'une technique spéciale est délibérément prévue pour augmenter la densité des stériles, ce pourcentage peut dépasser 60 %. Le rapport éléments solides/eau influence beaucoup les techniques de mise en dépôt des stériles.

La quantité de stériles dépend de la taille de l'exploitation minière. Par exemple, une petite mine d'or peut produire moins de 100 tonnes/jour, alors que dans les très grandes mines de cuivre la production de stériles peut dépasser 150 000 tonnes/jour. Les principes servant de bases à la mise en dépôt des stériles sont identiques quelle que soit la quantité de stériles produite, une même attention devant être portée aux problèmes de sécurité, de coût et de lutte contre la pollution ; mais les méthodes adoptées varient suivant l'échelle des travaux.

are hollow spheres of glass like material formed in the intense heat of the furnaces, and in demand by many industries as non irritant powders and fillers. Cenospheres may cause particular design and operational problems, as described later.

The particle density of tailings particles is controlled by the nature of the host rock in the case of mining operations. For the great majority of operations the bulk of the material is derived from quartz and feldspars and the particle density of the particles lies in the range 2.60 to 2.70. Where mining economics or the limitations of extraction technology dictate that only a proportion of the mineral is extracted, the particle density of the resulting tailings reflect the presence of the mineral. For example, in the tailings from iron and coal mining operations, the aggregate particle density may be respectively greater than 4.0 and less than 2.0. The particle density of tailings from manufacturing operations may again vary widely and will need to be determined specifically for each operation.

The fluid phase of the tailings product for disposal is normally water derived from inland sources, although sea water is occasionally used. In a few, usually small scale, manufacturing processes other fluids may be part of or comprise the fluid medium. The nature and amount of dissolved solids in the water, determining its properties, will be controlled by its source and the extraction process used. These properties, together with the effect of its continued contact with the solid phase of the tailings, are important factors in the planning of the measures to prevent environmental pollution. The pH of the water may vary from being very acid, as may be experienced while mining organic alluvial deposits with a natural pH of 4 or less, to very alkaline, as may result from the addition of lime during or after the extraction process to give a pH of 10 or more.

The ratio of water to solids may vary according to the mining method, extraction process and the planned water budget for the project. In alluvial mining projects the percentage of solids may be 10% or less by weight of the total slurry; where the ore is mined dry and the flotation process is used for extraction, commonly employed in gold and copper mining operations, the solids content of the tailings may be in the region of 25%; where a thickener is used to recover a proportion of the water before the tailings are sent for disposal, the slurry may have a solids content of 50 to 55%; where a specially designed high performance thickener is used deliberately to increase the density of the tailings, the solids content may be as high as 60% or more. The ratio of solids to water has a profound effect on the methods which may be used for disposal of the tailings.

Production rates of tailings clearly vary with the size of the mining operation. For example, a small gold mining operation may produce less than 100 tons/day, whilst the largest copper mines may produce over 150 000 tpd. The principles of construction are similar for the full range of production rates, with similar attention having to be paid to safety, economy and the avoidance of pollution, but the methods adopted may vary to accord with the scale of the operation.

3.5. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX GRANULAIRES - PRINCIPES FONDAMENTAUX

La résistance au cisaillement d'un matériau granulaire dépend principalement de la force maintenant les particules ensemble. La facilité avec laquelle on manipule à la pelle et on déplace un sable sec en surface ne laisse pas présager la résistance au cisaillement très élevée qu'il possède en profondeur, où il est confiné et soumis au poids des matériaux sus-jacents.

La valeur de l'angle de cisaillement, en termes de contraintes effectives (ϕ'), dépend de la forme des grains, du type d'assemblage des grains (exprimé en densité relative), et de la force comprimant les grains entre eux. Cette force par unité de surface du matériau granulaire est désignée sous le nom de contrainte effective (σ'), car c'est elle qui intervient effectivement dans la détermination de la résistance et des déformations ; elle est égale à la contrainte totale appliquée au matériau (σ) moins la pression interstitielle (u), soit :

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{et} \quad \tau = (\sigma - u) \tan \phi'$$

On voit donc que la pression interstitielle joue un rôle capital dans la résistance au cisaillement (τ).

L'influence de la forme des grains et de la densité relative sera déterminée pour le type de stériles étudiés, à partir de séries d'essais.

Dans le cas d'une densité assez élevée, lorsque les grains sont étroitement serrés, les déformations de cisaillement les forcent à se séparer de sorte qu'il y a expansion du matériau. En conditions non drainées, comme cela peut se présenter dans les zones saturées des remblais, il y a diminution de la pression interstitielle, d'où une augmentation de σ' et de la résistance au cisaillement τ .

Une situation inverse peut survenir dans le cas d'une faible densité, lorsque les grains présentent une structure lâche. Les éléments de la fraction fine des stériles, sédimentant sous l'eau, peuvent se déposer si doucement sur les particules sous-jacentes qu'ils constituent une structure très ouverte. La consolidation ultérieure résultant de l'augmentation de la masse des stériles déposés réduit les vides interstitiels, mais la structure ouverte se maintient. Les déformations de cisaillement disloquent les contacts entre particules, ce qui leur permet de pénétrer dans les vides interstitiels, entraînant ainsi une contractance ou, dans des conditions non drainées, une augmentation de la pression interstitielle u . Cette augmentation de u réduit σ' et donc la résistance au cisaillement τ . La densité critique de Casagrande (1936) correspond à la situation où les déformations ne causent aucun changement.

Dans un corps constitué de stériles de faible densité, la pression interstitielle au cours du cisaillement peut atteindre la valeur de σ , réduisant ainsi τ à zéro. On appelle cette situation « liquéfaction » : la masse se comporte comme un liquide dense et, si elle peut s'écouler (par exemple, dans le cas d'une brèche dans le barrage), elle exerce une force considérable sur tout objet situé sur son parcours. C'est la raison pour laquelle une lâchure de stériles risque de causer beaucoup plus de dégâts qu'une lâchure d'eau.

3.5. PROPERTIES OF PARTICULATE MATERIALS - BASIC CONCEPTS

The shear strength of a particulate material depends mainly on the force holding the particles together. The ease with which a dry sand on the surface can be shovelled and moved belies the very considerable shear strength it possesses at depth, where it is confined and subject to forces caused by the weight of overlying material.

The value of the angle of shearing resistance in terms of effective stresses (ϕ') depends on grain shape, the way the grains are packed together (measured in terms of relative density), and the force pressing them together. This force, per unit area of the particulate material, is referred to as the effective stress (σ'), because it is effective in determining strength and deformations, and is defined as the total stress applied to the material (σ), less the pore pressure (u), ie.

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{et} \quad \tau = (\sigma - u) \tan \phi'$$

From this it can be seen that pore pressure plays a vital role in the potential shear strength (τ) that can be developed.

The influence of grain shape and relative density must be determined for the particular tailings of concern from series of tests.

With a high enough density, when the grains are closely packed together, shearing strains force them apart so that the material expands. In undrained conditions, such as may occur in the saturated parts of embankments, this creates a fall of pore pressure, thereby increasing σ' and hence shear strength τ .

An opposite condition can occur with low density, when the grains are very loosely packed. Particles of the finer fraction from tailings, settling under water, can land so gently on the lower particles that they build up a very open structure. Subsequent consolidation under the increasing weight of added material reduces pore space to some extent, but the delicate, open nature of the structure persists. Shearing strains dislodge the contacts between particles, allowing them to move into pore spaces, so causing contraction or, if undrained, a rise of pore pressure u . This rise reduces σ' and hence the shear strength τ . The critical density of Casagrande (1936) gives the inbetween situation, when shear strains cause no change.

In a body of low density tailings, the pore pressure during shearing may rise to equal σ , so reducing τ to zero. This situation is called liquefaction: the mass behaves as a dense liquid and if it is free to flow (dam breach) it can exert considerable force on any object in its path. It is because of this that a release of tailings can cause so much more damage than a corresponding release of water.

Les déformations de cisaillement résultant de secousses sismiques peuvent causer une liquéfaction dans des stériles de consistance lâche ; les déformations de cisaillement le long d'une surface de glissement potentielle sont susceptibles d'entraîner une perte importante de résistance au cisaillement, dont on doit tenir compte lors de l'étude de stabilité du barrage. Les calculs de stabilité font l'objet de l'Annexe A.

3.6. PRISE EN COMPTE DES FONDATIONS

La stabilité peut être étudiée en tenant compte des pressions interstitielles ou des conditions de fondation dans les cas où le terrain naturel qui sera recouvert par le barrage a des caractéristiques de résistance inférieures à celles des matériaux de construction du barrage. Cela s'applique, en particulier, aux sols argileux de fondation. La résistance non drainée de la fondation est parfois suffisante pour une certaine hauteur du barrage ; mais l'augmentation de la résistance due à la consolidation sous l'augmentation du poids propre du barrage de stériles est parfois insuffisante pour maintenir la stabilité au cours de la montée du barrage. La cadence prévue pour la construction du barrage, c'est-à-dire la vitesse de chargement de la fondation (en particulier, si le sol est argileux), sera comparée à la vitesse de consolidation prévue. Les cadences de construction sont généralement assez lentes pour que des couches relativement minces puissent se consolider suffisamment ; mais, dans le cas de couches épaisses d'argile plastique, on doit veiller à accélérer leur consolidation en installant des drains verticaux au cours de la préparation de la fondation. Lorsqu'une surface de glissement profonde traverse une couche épaisse d'argile, on considèrera, dans le calcul de stabilité, le risque de rupture progressive (Potts et al. 1990) si l'argile présente un comportement fragile. Une étude géologique peut indiquer l'existence probable de surfaces de cisaillement, laissées par d'anciens glissements de terrain, l'action glaciaire ou un fluage vers le bas du versant. Le projet ne devra prendre en compte que la résistance résiduelle la plus faible sur de telles surfaces. Les contraintes de cisaillement induites dans l'argile peuvent être réduites en diminuant l'angle du talus aval du barrage, et la stabilité améliorée en adoptant (si des matériaux sont disponibles) un remblai d'amorce en enrochement lourd, ancré profondément dans la couche d'argile de fondation pour constituer un pied massif.

Les paramètres de résistance relatifs aux fondations argileuses seront déterminés à partir d'essais in situ ou en laboratoire sur des échantillons non remaniés prélevés dans toute l'épaisseur de la couche. Ces paramètres varient souvent avec la profondeur et il conviendra parfois de diviser la fondation en plusieurs couches, des caractéristiques de résistance et de consolidation étant attribuées à chacune de ces couches. Les valeurs les plus faibles de la résistance résiduelle seront déterminées lorsqu'il y a vraisemblablement des surfaces de cisaillement préexistantes. La position de la surface de glissement la plus critique dépend des caractéristiques de la fondation argileuse ainsi que des pressions interstitielles prévues.

La prévision des pressions interstitielles dans une fondation argileuse est très difficile. Le développement des pressions interstitielles dépendra de la vitesse de chargement, des caractéristiques de consolidation, des perméabilités horizontales et verticales, de la position des couches drainantes et des pressions interstitielles

The shearing strains produced by seismic shocks in loose tailings can cause liquefaction and the shearing strains along a potential slip surface can result in considerable loss of shear strength which must be taken into consideration when assessing dam stability. Stability analyses are discussed in Appendix A.

3.6. FOUNDATION CONSIDERATIONS

Stability may be controlled by considerations of pore water pressures or foundation conditions in cases where the natural ground that will be covered by the dam has strength characteristics that are inferior to those of the dam construction materials. This applies particularly to clayey foundation soils. The existing undrained foundation strength may be sufficient for a certain height of dam, but the increase of strength caused by consolidation under the increasing weight of the tailings dam may be insufficient to maintain stability as dam height increases. The predicted rate of construction of the dam, i.e. the rate of loading of the foundation especially if clay, must be compared with its predicted rate of consolidation. Usually rates of construction are slow enough to give time for sufficient consolidation of relatively thin layers, but with thick layers of fat clay, consideration may have to be given to accelerating their rate of consolidation by use of vertical drains, installed during foundation preparation. Stability analysis involving a deep seated slip surface passing through a thick clay layer should consider the risk of progressive failure (Potts et al 1990) if the clay exhibits brittle behaviour. A geological assessment may indicate the probability of existing slip surfaces, left by old landslips, glacial action or downslope creep. Design would have to allow for only the lowest residual strength on such surfaces. The shearing stresses induced in the clay can be reduced by reducing the angle of the downstream slope of the dam and stability can be improved by the use (if available materials exist) of a heavy rockfill starter dam keyed deep into the foundation clay layer to form a heavy toe.

The strength parameters for foundations on clay should be determined from in situ tests or laboratory tests on undisturbed samples taken from the whole depth of the strata. There may be variations with depth and it may be convenient to divide the foundation into several layers, each allocated specific strength and consolidation characteristics. Lowest values of residual strength should be determined for use where pre-formed slip surfaces are expected to be present. The position of the most critical potential slip surface is likely to be controlled by the characteristics of the clay foundation, combined with the predicted pore pressures.

The prediction of pore pressure in a clay foundation is very difficult. The developed pore pressures are controlled by rates of loading, consolidation characteristics, permeabilities in horizontal and vertical directions, position of drainage layers and the pore pressure transmitted from the overlying tailings impoundment

provenant du barrage et de la zone de dépôt des stériles. Il est certes indispensable de faire des prévisions sur les pressions interstitielles pour l'établissement du projet du barrage de stériles ; mais, on doit également mesurer les pressions interstitielles réelles au cours de la construction afin de vérifier la validité des prévisions et de pouvoir modifier, le cas échéant, la conception initiale en vue de garantir la sécurité et d'assurer un comportement satisfaisant du barrage et de la retenue de stockage des stériles. Les appareils de mesure des pressions interstitielles, etc. sont examinés en détail par Dunicliff (1988).

Les sols sableux et les sols contenant des couches de sable ou de sable-gravier facilitent le drainage de la base du remblai et des stériles stockés. Lorsque ces sols sont compacts, ils constituent une fondation résistante. Cependant, si l'eau drainée provenant des stériles est légèrement toxique, il est parfois nécessaire de collecter les écoulements horizontaux dans des puits filtrants, espacés de façon à capter toutes les percolations, ou de construire des murs parafoilles dans le sol afin de couper l'écoulement horizontal et le diriger vers un fossé ou un petit bassin aval, l'eau ainsi collectée étant retournée à la retenue de stockage ou à l'usine de traitement, par pompage.

Lorsque les fondations contiennent de fortes épaisseurs de gravier ou qu'elles sont constituées de roches très fissurées ou karstiques, les murs parafoilles ou les puits filtrants peuvent s'avérer insuffisants pour empêcher la pollution de la nappe phréatique par l'eau drainée. Si le degré de toxicité qui en résulte pour la nappe phréatique est inacceptable, il sera nécessaire de mettre en place un tapis imperméable sur toute la surface devant être recouverte par la retenue de stockage des stériles (voir paragraphe 4.3.2.).

3.7. PRISE EN COMPTE DES SÉISMES

Le concepteur d'un barrage de stériles devra prendre en considération a) le niveau de sismicité du site, b) la capacité du barrage de stériles proposé à résister aux charges sismiques prévues, c) la situation de la retenue de stockage par rapport aux zones d'habitation, d) l'existence d'un plan d'alerte et de secours local. Le Bulletin 98 (1995) « Barrages de stériles et sismicité » traite de ces problèmes et présente une synthèse des connaissances actuelles.

3.8. CONCEPTION DES BARRAGES CONSTITUÉS PRINCIPALEMENT DE STÉRILES

Lorsque la retenue de stockage est située à quelque distance de la source de stériles et afin d'éviter des coûts élevés de transport par camions, il sera souvent économique de construire la plus grande partie du barrage en utilisant des stériles acheminés par voie hydraulique, même s'il y a un surplus de déblai à la mine ou à l'usine de production.

La convenance des stériles comme matériau de construction dépend du type de roche dont ils sont issus, du degré de broyage nécessaire à l'extraction des métaux, et des effets du traitement chimique utilisé dans le procédé d'extraction.

and dam. While it is essential to make predictions of expected pore pressure to enable design for the proposed tailings dam to evolve, the actual pore pressures developed must be measured during construction to check on the accuracy of the predicted values and to enable modifications to be made to the initial design to ensure safety and a satisfactory behaviour for the tailings dam and impoundment. Instrumentation to measure pore pressures, etc. are discussed in detail by Dunicliff (1988).

Sandy soil and ground containing layers of sand or sandy-gravel can be of benefit by improving drainage from the base of an embankment and from the impounded tailings. When dense, this type of soil provides a strong foundation. If, however, the drained leachate from the tailings is slightly toxic, it may be necessary to collect horizontal flows into filter wells, spaced so as to trap all the leachate, or build cut-off walls in the ground to intercept the horizontal flow and bring it up into a downstream collecting ditch or small reservoir, to be pumped back up on to the impoundment or directly to the processing plant.

When there are great depths of gravel or the underlying rock is very fissured or karstic, vertical cut-offs or filter wells may not be sufficient to prevent the pollution of ground water by draining leachate. If the degree of toxicity produced in the ground water is unacceptable, it will be necessary to form an impervious layer over the whole area to be covered by the impoundment. (see Section 4.3.2.).

3.7. EARTHQUAKE CONSIDERATIONS

The designer of a tailings dam will wish to take into consideration a) the level of seismic activity that may occur at the site, b) the ability of the proposed tailings dam to survive predicted shock induced loadings, c) the proposed siting of the impoundment relative to areas of habitation and d) the existence of a local emergency plan. Bulletin No.98 (1995) 'Tailings Dams and Seismicity' deals with these problems and gives the current state-of-the-art on the subject.

3.8. THE DESIGN OF DAMS CONSTRUCTED MAINLY FROM TAILINGS

In situations where the storage lagoon has to be situated some distance from the source of the tailings it may be more economic to construct as much of the dam as possible from hydraulically transported tailings, even though there may be a surplus of waste fills at the mine or production plant, to avoid haulage costs.

The suitability of tailings as a construction material depends on the type of rock from which they were derived, the degree of grinding required for extraction of the metals and the effects of chemical treatment used in the extraction process.

Comme indiqué au chapitre 3.4., la granulométrie des stériles miniers est comprise généralement entre 2 mm et 0,0005 mm, c'est-à-dire qu'elle recouvre les catégories sable ou sable fin, silt et argile dans une certaine mesure. Les propriétés mécaniques des stériles dépendent des dimensions, de la granulométrie et de la forme des grains. Les stériles qui présenteront la plus grande résistance et la plus forte capacité de drainage (qui conviendront donc le mieux à la construction du barrage) sont les éléments les plus grossiers : sable, sable fin et silt grossier.

Un problème auquel est souvent confronté le concepteur d'un nouveau projet est la connaissance des propriétés probables des stériles devant être produits. Pour l'étude préliminaire, il pourra utiliser les propriétés de stériles identiques produits ailleurs à partir de procédés comparables. Néanmoins, comme cela a déjà été indiqué, la cadence relativement lente de construction des barrages de stériles permet d'apporter des modifications à la conception initiale au cours des travaux, en vue d'améliorer la construction.

3.9. BARRAGES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AMONT

3.9.1. La plage

La réalisation d'une plage est le procédé traditionnel pour utiliser la fraction grossière de stériles dans la construction du barrage. En théorie, la boue de stériles déversée au sommet de la plage s'écoule, sous la forme d'une nappe mince uniforme, vers le bas de la plage ; la catégorie « sable » se dépose sur la première partie de la plage, la catégorie « silt grossier » sur la deuxième partie, seules les catégories « silt fin » et « argile » étant transportées au delà de l'extrémité inférieure de la plage et pénétrant dans la retenue d'eau. En pratique, le mouvement deltaïque de la boue déversée par les buses (spigots) présente une configuration complexe, se conformant largement à la théorie, mais transportant quelques matériaux grossiers dans la retenue, ce qui peut conduire à un dépôt très stratifié en forme de feuillets comprimés. De cette façon, les éléments solides constituent la plage et surélèvent son niveau, tandis que l'eau ayant servi au transport, contenant encore les particules les plus fines, s'écoule dans la retenue. En raison de la lente progression des particules fines le long de la retenue, leur sédimentation est suffisante pour constituer une mare d'eau relativement claire à l'extrémité de la retenue. Cette eau qui peut encore contenir des matières dispersives et autres produits chimiques sera avantageusement retournée, par pompage, à l'usine de traitement pour réutilisation. La sédimentation des fines sous l'eau produit des vases, constituant une masse de matériaux de faible densité et de structure sans consistance. La formation de telles plages a été étudiée en détail par Abadjiev (1985a) et Blight (1987).

Étant donné que la dimension des particules diminue à partir du talus aval en allant vers l'amont, la perméabilité diminue donc. Il en résulte un abaissement et une modification de la forme de la ligne de saturation dans le remblai par rapport à celle correspondant à un remblai de perméabilité homogène. Cet effet améliore la stabilité et contribue à expliquer la bonne tenue d'un grand nombre de barrages anciens construits par la méthode amont. Cette question est examinée en détail dans le Bulletin 97 « Barrages de stériles - Conception du drainage », Annexe A.

As described in Section 3.4, particle sizes found in mine tailings usually lie between 2 mm and 0.0005 mm, i.e. they have the sizes of sand or fine sand, silt and some clay. The mechanical properties of the tailings are affected by the sizes, distribution of sizes and on the shape of the particles. Those tailings which will form fill with the greatest potential strength and greatest ability to drain (the most suitable for dam construction) are those with the larger sizes: sand, fine sand and coarse silt.

A problem frequently facing the designer of a new project is that of knowing the likely properties of the tailings that are to be produced. His initial design may be based on the properties of similar tailings produced from similar processes elsewhere. Nevertheless, as has already been mentioned, the relatively slow rate of construction of tailings dams provides the opportunity for changes to be made to the original design concept during development, to ensure the most suitable construction.

3.9. DAMS CONSTRUCTED BY THE UPSTREAM METHOD.

3.9.1. The beach

The use of a beach is the traditional way for obtaining the coarsest fraction from the tailings for dam building. In theory the tailings slurry released at the top of the beach spreads out as a uniform thin sheet which flows down the beach at such a rate that the sand sizes settle out over the first part of the beach, the coarse silt over the second part and only the fine silt and clay are carried beyond the lower end into the liquid pool of the impoundment. In practice, the deltaic movement of the slurry, discharged from the pipe spigots, produces a complex pattern, conforming largely to this theoretical principle but carrying some coarser material into the body of the impoundment producing eventually a highly stratified deposit not dissimilar to a compressed leaf like structure. In this way the solid particles build up the beach and raise its level, while the transportation water, still carrying the finest particles flows into the body of the impoundment. As it progresses slowly over the length of the impoundment the fines settle sufficiently to leave a pool of relatively clear water at the far end of the impoundment. This may still contain dispersive and other chemicals and can, with advantage be pumped back to the processing plant for reuse. The sedimentation of the fines under water produces the slimes, a mass of low density material with a very loose structure. Abadjiev (1985a) and Blight (1987) have considered beach formation in detail.

As the particle size decreases from the downstream slope with the distance upstream, so the permeability decreases. This has the effect of lowering and altering the shape of the phreatic surface in the embankment from that which it would have had if the material had been of a homogenous permeability. This effect improves stability and helps to explain the stability of many of the early upstream types of dams. It is an aspect fully discussed in Bulletin No.97 (1994) 'Tailings Dams: Design of Drainage', Appendix A.

3.9.2. Paramètres de résistance

En règle générale, on peut s'attendre à une diminution des valeurs des paramètres de résistance au cisaillement avec la réduction des dimensions des particules et la réduction de densité. Parmi tous les matériaux intervenant, le sable grossier constituant le parement extérieur du barrage présentera les valeurs les plus élevées pour les paramètres de résistance, en partie à cause de la présence de gros éléments, en partie à cause d'une densité plus élevée qui peut être augmentée par compactage mécanique. Les valeurs des paramètres de résistance tendent à diminuer au fur et à mesure que l'on pénètre dans le corps de la retenue de stockage, du fait de la réduction de la taille des particules et des densités plus faibles souvent trouvées à une certaine distance du point de déversement.

L'amélioration de la densité, qui permet d'améliorer la stabilité et d'augmenter la capacité de stockage de résidus dans un volume donné, est donc un aspect important. La résistance aux séismes sera beaucoup améliorée si la densité peut être augmentée au-dessus de la valeur critique. Klohn et al. (1981) et Mitchell (1981) ont examiné l'utilisation d'explosifs pour accroître la densité de stériles lâches. S'il est intéressant d'améliorer la densité des stériles constituant un barrage construit par la méthode amont, les explosifs, par contre, peuvent détériorer le dispositif de drainage. Pour le corps de la retenue de stockage, il sera cependant avantageux d'augmenter la masse volumique des stériles stockés et réduire le risque de liquéfaction.

Avant la construction, on évalue, à partir d'essais en laboratoire, la valeur de ϕ' pour diverses fractions granulométriques des stériles. Les échantillons destinés aux essais seront préparés à diverses densités relatives, par exemple de 20 % à 80 %, en vue d'obtenir une plage de valeurs pour ϕ' . Au stade de l'étude préliminaire, on estimera l'étendue des zones de matériaux de diverses granulométries et leurs densités relatives. Des méthodes destinées à évaluer les caractéristiques physiques des stériles mis en dépôt ont été données par Abadjiev (1985a).

Il est peu probable que la stabilité soit critique au cours des premières étapes de construction. Des essais in situ seront exécutés pour déterminer les densités et les granulométries réelles dans la partie basse du barrage, et obtenir une nouvelle estimation des paramètres de résistance. On peut utiliser des carottiers du type « à piston » pour prélever des échantillons relativement non remaniés dans des forages que l'on maintient remplis d'une boue de forage de densité légèrement supérieure à celle des boues de stériles. A ce stade, une nouvelle étude peut démontrer la nécessité d'apporter de légères modifications à la conception initiale et d'adapter les méthodes de construction (voir chapitre 4) en vue d'obtenir les résultats requis.

3.9.3. Pressions interstitielles et drainage

Un contrôle adéquat et efficace de l'eau est obligatoire pour assurer la sécurité des barrages construits par la méthode amont. La plupart des ruptures survenues sur des barrages de ce type ont été dues à l'eau provoquant des érosions ou des pressions interstitielles inacceptables.

Un contrôle est nécessaire pour empêcher la retenue d'eau d'empiéter sur la plage. Si l'évacuation de l'eau est limitée par une rupture du dispositif de décanation, ou s'il y a une augmentation excessive des apports par suite d'une

3.9.2. Strength parameters

As a further generalisation, the values of the shear strength parameters may be expected to decrease with reduction of particle size and reduction of density. The strength parameters for a coarse sand forming the outer face of a dam will be the highest in value of all the constituent materials partly because of the presence of larger particles and partly because of greater density, which may have been improved by mechanical compaction. Strength parameters tend to decrease with distance into the body of the impoundment due to the reduction in particle size and the lower densities often found distant from the point of deposition.

Improving density is an important aspect both in improving stability and enabling more waste to be stored in a given volume. Resistance to earthquake would be greatly enhanced if density could be increased above the critical value. Klohn et al (1981) and Mitchell (1981) have discussed the use of explosives to improve the density of loose tailings. While it would be valuable to improve the density of tailings forming a dam constructed by the upstream method, explosives could damage the drainage system, resulting in an adverse effect. For the body of the impoundment, however, it could be advantageous in giving increased weight of storage and reduced risk of liquefaction.

Prior to construction, an assessment can be made of the value for ϕ' for the various grain size fractions of the whole tailings from laboratory tests. These should be determined from samples prepared at varying relative densities to define a range of ϕ' values for relative densities of, say, 20% to 80%. At the initial design stage, estimates can be made of the expected extent of zones of materials of various grain sizes and of their relative densities. Methods for estimating the physical characteristics of deposited tailings have been given by Abadjiev (1985a).

Stability during the first stages of construction is unlikely to be critical. In situ tests can be carried out to determine the actual densities and grain sizes found in the lower part of the dam, and to obtain a further assessment of strength parameters. Piston samplers may be used to obtain relatively undisturbed samples for laboratory testing from boreholes kept full of a drilling mud of density slightly greater than that of the slimes. Further analysis at this stage may show the need for slight alterations to the initial design and adjustments made to the methods of construction (considered in Chapter 4) to achieve the required results.

3.9.3. Pore pressures and drainage

Adequate and effective control of water is imperative to the safety of dams built by the upstream method. The majority of the failures of these type of dams has been due to water, causing erosion or undesirable pore pressures.

Control is required to prevent the water pool from encroaching upon the beach. If the outflow is restricted by failure of a decant system, or inflow increases excessively due to failure of a diversion system or as a result of an exceptional

défaillance des ouvrages de dérivation ou à cause d'une crue exceptionnelle, il peut y avoir rupture du barrage causée par la montée du niveau d'eau et par des percolations excessives, avant que la crête soit elle-même submergée.

La ligne de saturation qui, loin du remblai, est au niveau de la retenue d'eau sera maintenue à l'intérieur du corps du barrage, pour éviter toute instabilité pouvant se manifester si cette ligne atteint le talus aval, entraînant une érosion de ce talus. Dans le passé, des barrages de faible hauteur ont été construits sans dispositif particulier de drainage ; fondés sur un sol sec, perméable, ces barrages ont eu un comportement satisfaisant. Mais, sur des sols de faible perméabilité ou s'il est nécessaire de surélever le barrage au-dessus de sa hauteur initiale de projet, la ligne de saturation peut s'élever et intersecter le talus aval. Dans ces conditions, l'eau interstitielle commencera à sortir sur le talus et les contraintes effectives risquent d'être suffisamment réduites pour permettre le développement de petits cercles de glissement. Ces lignes de glissement pénètrent en arrière dans des zones de pressions interstitielles plus élevées, favorisant ainsi la naissance de glissements plus étendus et plus profonds ; des mesures immédiates - mise en place de couches de matériaux drainants et filtrants, chargement de pied - doivent être prises pour éviter une rupture progressive sérieuse. La conception des nouveaux barrages, construits par la méthode amont, devra comprendre des mesures appropriées de drainage.

Le dispositif de drainage mis en place dans les stériles au cours de la construction est vital pour la stabilité des barrages exécutés par la méthode amont. La conception d'un dispositif très efficace nécessite beaucoup de soin, de même que pendant les travaux afin d'éviter des défauts de construction et le colmatage du dispositif. Un drainage efficace est une assurance à bas prix, car il est très difficile de faire des réparations dans les étapes ultérieures de la vie du barrage.

La conception du drainage est traitée en détail dans le Bulletin 97 « Barrages de stériles - Conception du drainage », qui examine aussi la conception des filtres.

Une faiblesse peut résulter de l'accumulation de boues immédiatement à l'amont du remblai d'amorce au cours des premières étapes de la construction. En général, ces boues ont une valeur ϕ' inférieure à celle de la fraction grossière utilisée pour la construction du barrage et tendent à engendrer des pressions interstitielles positives sous l'effet des déformations de cisaillement. Dans cette situation représentée par A dans la Fig. A.2., ces boues peuvent se situer sur le tracé d'une ligne de glissement profonde, lorsque le barrage s'approche de sa hauteur totale. Il y a également une réduction importante de la résistance du barrage vis-à-vis des forces sismiques. L'adoption d'un tapis drainant prolongeant le remblai d'amorce, comme recommandé dans le Bulletin 97, permet d'éviter cette situation. Plus la zone de matériau grossier compacté et bien drainé, le long du tracé d'une ligne de glissement potentielle, sera étendue, plus le barrage sera stable.

En résumé, on peut indiquer qu'une bonne construction par la méthode amont nécessite :

- des stériles contenant une fraction grossière adéquate,
- un remblai d'amorce prolongé par un tapis,

flood, the dam may fail as a result of rising water level and excessive seepage before the crest is itself overtopped.

The phreatic surface, which remote from the embankment, is at pond level, should be contained within the body of the dam, to avoid the instability that can be caused should it reach the downstream slope and begin exit erosion. In the past, low dams have been built without special drainage measures and when on dry, permeable ground, have been successful. But on ground of low permeability or if the need has arisen to raise the dam above its original design height, the phreatic surface may rise and intersect the downstream slope. In these circumstances pore water will begin to drain from the face of the slope and effective stresses may be sufficiently reduced to allow small rotational slips to develop. These cut back into regions of ever higher pore pressures, so that larger, deeper slips occur and immediate remedial action of applying layers of filter drainage material and toe weighting may become necessary to avoid progressive, serious failure. It is very important that the design of new dams, if constructed using upstream methods, should incorporate adequate drainage measures.

Drainage, built into the tailings during construction, is essential to the stability of dams built by the upstream method. Careful design is required to produce a fully effective scheme, and the greatest care is needed during construction to prevent faults and blinding from occurring. Effective drainage should be viewed as cheap insurance, because it is very difficult to do some form of remediation in the latter stages in the life of the dam.

The design of suitable drainage is dealt with in greater detail in Bulletin No.97, 'Tailings dams: design of drainage', which also discusses the design of filters.

Weakness can be caused by allowing the slimes to accumulate immediately upstream of the starter dam during the early stages of construction. In general this material has a lower value of ϕ' than the coarser fraction used for dam construction and tends to develop positive pore pressures under shearing strains. In this position, shown by A in Fig. A.2, it can be on the path of a deep seated slip surface as the dam approaches full height. It also considerably reduces the resistance of the dam to seismic forces. The use of an extended drained toe for the starter dam, as advocated by Bulletin No.97, can avoid this situation. Clearly the greater the extent of compacted, well drained coarser material along the path of any potential slip surface, the more stable the dam will be under any circumstances.

In summary, it can be said that good upstream construction requires:

- tailings containing an adequate fraction of coarse sizes
- starter dam with an extended toe

- l'incorporation d'un bon drainage,
- l'adoption d'une plage de grande largeur.

3.10. BARRAGES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE DES BASSINS (ENCLOS) (VOIR CHAPITRE 2.2.2. F₃)

Cette méthode de construction convient aux stériles ne contenant pas de fraction grossière, pour la constitution de retenues de stockage de dimensions modérées ; elle a été très utilisée dans les mines d'or, en Afrique du Sud. Elle est parfaitement adaptée aux climats secs, avec un fort degré d'évaporation, et aux sites relativement plats. Il n'est pas nécessaire de séparer les diverses catégories granulométriques, de sorte que ni plage ni cyclone ne sont requis. Les stériles des mines d'or sont généralement des silts de dimension assez uniforme : le minerai est concassé et broyé à cette dimension pour obtenir l'extraction maximale d'or. La résistance dans le barrage se développe au fur et à mesure que l'eau ayant servi au transport s'évapore des couches de boues, de faible épaisseur, exposées à l'air dans les bassins (enclos). Les stériles contenant une catégorie grossière d'éléments peuvent entraîner une stratification horizontale avec risque de percolation d'eau depuis la retenue de stockage, et d'érosion interne, comme cela s'est produit à Bafokeng (Jennings, 1979). Du fait que la consolidation est influencée par le séchage, des couches drainantes à l'intérieur du remblai présentent un inconvénient, de l'eau risquant de pénétrer dans du remblai sec.

En vue de maintenir la ligne de saturation suffisamment éloignée du talus aval, un large tapis filtrant-drainant sera mis en place sur la fondation avant le début de la construction du barrage. La conception du filtre exige beaucoup de soin afin d'éviter son colmatage par les éléments fins des stériles. Ce problème de conception est traité en détail dans le Bulletin 97 « Barrages de stériles - Conception du drainage ».

La plupart des premiers barrages construits par cette méthode en Afrique du Sud n'avaient pas de tapis filtrant-drainant et comptaient sur le niveau très bas de la nappe phréatique et la perméabilité du terrain naturel pour assurer le drainage. A cette époque, des considérations environnementales n'obligeaient pas à prendre des mesures pour empêcher la pénétration de l'eau de drainage dans le sol.

Les talus extérieurs des barrages construits par la méthode des bassins nécessitent une protection contre l'érosion par l'eau et le vent. Le ravinement sera réduit en prévoyant des risbermes séparées par des talus relativement raides. Une pente moyenne de 1 sur 2, de stabilité satisfaisante, pourra être obtenue en plaçant des risbermes tous les 10 m de hauteur, séparées par des talus de pente 1 sur 1. Les risbermes auront une pente transversale de l'ordre de 1 sur 60 vers l'intérieur, avec un caniveau revêtu disposé le long du bord interne et relié à un tuyau du système de drainage.

Il est nécessaire de prévoir une protection supplémentaire pour empêcher l'érosion par le vent et la pluie, risquant d'obstruer les caniveaux, ce qui nécessiterait un nettoyage régulier. La réalisation d'une couverture végétale est la meilleure solution, mais elle n'est pas toujours possible au cours de la construction ; on peut donc envisager des mesures provisoires, telles qu'une légère induration des matériaux par application de produits chimiques.

- the incorporation of good drainage
- use of a beach of considerable width

3.10. DAMS CONSTRUCTED BY THE “PADDOCK” METHOD (SEE SECTION 2.2.2 F₃)

This method of construction is suitable for tailings containing no coarse fraction, to form impoundments of moderate size, and has been used extensively at gold mines in South Africa. It is well suited to a dry climate with high rates of evaporation and relatively flat sites. It is not necessary to separate grain size fractions so neither beach nor cyclone are required. Gold mine tailings tend to be of a fairly uniform silt size: the ore is crushed and ground to this size to obtain the maximum extraction of gold. Strength in the dam is developed by pore water suction as the transportation water evaporates from the thin layers of slurry exposed in the flat paddocks. Tailings containing a coarser fraction may cause horizontal layering that can conduct water from the impoundment and lead to piping, as occurred at Bafokeng, described by Jennings (1979). Because consolidation is influenced by drying, drainage layers within the fill can be a disadvantage and may carry water into the otherwise dry fill.

In order to keep the phreatic surface some distance away from the downstream face, a wide filter drainage blanket should be placed on the foundation surface, before dam construction begins. The filter requires the most careful design to prevent it becoming clogged by the fine tailings. This aspect of design is fully covered by Bulletin No.97 (1994) ‘Tailings Dams: Design of Drainage’.

Most of the earlier dams built by this method in South Africa did not have filter drainage blankets and relied on the very low water table and permeability of the natural ground to provide downward drainage. Environmental considerations in those times did not require measures to be taken to prevent the drainage of pore water into the ground.

The outer slopes of paddock dams require protection against water and wind erosion. Gullying can be reduced by providing berms, with relatively steep slopes between them. A safe average slope of say 1 on 2 can be constructed with berms typically every 10 m vertical height, with slopes of 1 on 1 between them. The berms should have an inward slope of about 1 on 60 with a lined gutter along the inner edge connected to a piped drainage system.

Additional protection is required to prevent wind erosion and erosion by rainfall, that tends to block the gutters, which require regular cleaning. The establishment of vegetation cover is the best solution but this is not always feasible during construction, and temporary measures, such as chemical spraying to provide light cementing may be considered.

Du fait que leur construction nécessite un gros travail, les barrages exécutés par la méthode des bassins, du type sud-africain, n'ont pas la préférence pour les nouveaux barrages. On doit cependant noter que les bassins, réalisés au moyen d'engins de terrassement, ont été incorporés dans la construction d'autres types de barrages de stériles, comme indiqué au chapitre 4.5.1.

3.11. BARRAGES CONSTRUIITS PAR LES MÉTHODES AVAL ET DE L'AXE CENTRAL (VOIR CHAPITRE 2.2.2. E₁, E₂)

Ces méthodes de construction conviennent aux stériles contenant une proportion élevée de matériaux de la catégorie grossière. Les stériles grossiers déversés par les hydrocyclones acquièrent une densité relativement élevée, lors de leur dépôt, sous l'effet du drainage de l'eau. La densité relative varie suivant la nature du produit et peut être de l'ordre de 50 %. Sur certains aménagements, cette densité, ainsi que le drainage de la zone, permettront d'assurer une protection satisfaisante contre le risque de liquéfaction. Sur d'autres aménagements où le risque sismique est élevé, la densité est faible et/ou le drainage est moins efficace, il est parfois nécessaire d'effectuer un compactage mécanique des matériaux déposés.

Le drainage de l'eau à travers la zone de stériles grossiers, au cours de la mise en dépôt, ainsi que les chutes de pluie et la percolation d'eau depuis l'amont du remblai, peuvent conduire à une accumulation d'eau à la base de la zone. Un dispositif de drains-filtres est nécessaire pour évacuer l'eau afin d'éviter la formation de pressions interstitielles. De plus, un massif de pied en enrochement ou gravier, séparé des stériles par un tapis filtrant, est souvent incorporé pour éviter que la base ne devienne un bourbier.

Lorsque la proportion de stériles grossiers séparés par l'hydrocyclone est insuffisante pour maintenir la construction du remblai en avance par rapport au niveau de la retenue de stockage, il est parfois nécessaire de compléter la zone de stériles par une zone constituée de remblai d'emprunt, afin d'accélérer la construction du remblai.

On peut utiliser les techniques ESA (effective stress analysis-calcul en contraintes effectives) pour la détermination des angles des talus amont et aval. Lorsque la fondation est de résistance très faible, la ligne de glissement la plus critique peut traverser les fines de la retenue et la fondation, mettant ainsi en danger tout le corps du barrage. La stabilité sera alors améliorée en adoptant des talus moins raides, en vue d'élargir la base du barrage, ou en chargeant le pied en vue d'allonger la ligne de rupture et augmenter la résistance du barrage.

Le talus amont de ces barrages est soutenu par la pression appliquée par la retenue de stockage qui monte à peu près à la même vitesse que le barrage. Le talus n'a pas à être stable de lui-même et, dans le cas d'une fondation résistante, la longueur d'une ligne de rupture potentielle traversant le barrage peut être faible tout en présentant un coefficient de sécurité satisfaisant, ce qui permet un talus amont presque vertical. Des secousses sismiques moyennes à fortes peuvent entraîner une liquéfaction des fines dans la retenue de stockage ; dans ce cas, le barrage doit être capable de supporter la poussée horizontale supplémentaire imposée par le liquide dense qui s'est constitué. A condition que les matériaux

Because of the need for considerable labour for their construction, paddock dams of the South African style are not favoured for new dams. It should be noted, however, that paddocks, built with the aid of earthmoving machinery, have been incorporated in the construction of other types of tailings dams, as described in Section 4.5.1.

3.11. DAMS CONSTRUCTED BY THE 'DOWNSTREAM' AND 'CENTRELINE' METHODS (SEE SECTION 2.2.2. E₁, E₂)

This method of construction is suitable for tailings containing a considerable proportion of coarser fraction material. Coarse tailings discharged from cyclones adopts a reasonably high density on deposition owing to the effect of the downward water drainage. The relative density varies with the product and may be in the region of 50%. In some projects this density, together with the drained condition of the zone, may be judged to provide adequate protection against liquefaction. In other projects, where the earthquake risk may be high, the density low and/or the drainage less efficient, it may be necessary to apply physical compaction to the deposited product.

The water draining through the zone of coarse tailings during deposition, together with direct rainfall and seepage water from upstream of the embankment, result in the accumulation of subsurface water at the base of the zone. A system of filter drains is needed to evacuate the water to prevent the build up of pore pressures. Additionally a rockfill or gravel toe, with an intermediate filter blanket between it and the tailings, is frequently incorporated to ensure a secure base free of sloughing.

Where the proportion of coarse tailings which may be separated out by hydro-cyclone is insufficient to permit the embankment construction to keep ahead of the rise of the impoundment level, the tailings zone may need to be supplemented by a zone of borrowed fill material to speed up embankment construction.

The angle of the upstream and downstream slopes can be designed using ESA (effective stress analysis) techniques. With a very weak foundation, the worst slip surface may pass through the slimes of the impoundment and the foundation, thereby endangering the whole body of the dam. Stability may then be improved by use of flatter slopes, to produce a wider dam base, or by toe weighting, to lengthen the path of a failure surface and increase the passive resistance of the dam.

The upstream slope of these dams is supported by pressure from the impoundment, which rises at about the same rate as the dam. The slope does not have to be stable in its own right and, with a strong foundation, the length of potential failure surfaces passing through the dam to provide an adequate factor of safety may be short enough to permit an almost vertical upstream slope. Moderate to severe seismic shocks can be expected to liquefy the slimes in the impoundment and the dam must be able to withstand the additional horizontal thrust imposed by what becomes, in effect, a dense liquid. Provided the coarse material comprising the dam is sufficiently well drained and has been sufficiently compacted, shearing

grossiers constituant le barrage soient suffisamment bien drainés et compactés, les déformations de cisaillement causées par le séisme provoqueront une diminution temporaire des pressions interstitielles et contribueront ainsi à la stabilité vis-à-vis de ces forces transitoires. On peut avancer que des secousses répétées desserreront les matériaux grossiers, de sorte qu'après plusieurs séismes la stabilité du barrage sera réduite. Le Bulletin 98 « Barrages de stériles et séismicité » (1995) traite en détail de la conception sismique de ces ouvrages.

3.12. BARRAGES CONSTRUITS AVEC DES REMBLAIS D'EMPRUNT (VOIR CHAPITRE 2.2.2. A, B, C ET D)

Ces barrages sont identiques à ceux créant une retenue d'eau et les méthodes de conception appliquées à ces barrages sont traitées dans d'autres documents. La plupart des Bulletins CIGB concernent les diverses questions se rapportant aux barrages avec retenue d'eau, et on peut s'y référer ainsi qu'aux nombreux manuels consacrés à ces ouvrages.

strains caused by earthquake will cause temporary falls of pore pressure (suctions) and so assist stability against these transient forces. It can be argued that repeated shaking will loosen the coarse material so that after numerous earthquakes, the stability of the dam will be reduced. A fuller discussion of design against earthquake is given in Bulletin No.98 (1995) 'Tailings Dams and Seismicity'.

3.12. DAMS BUILT FROM BORROWED FILL (SEE SECTION 2.2.2. A, B, C AND D)

These dams are essentially similar to the normal water retaining type of dam and design methods used for these dams are adequately covered elsewhere. The majority of ICOLD Bulletins deal with various aspects of water retaining dams and can be referred to together with the many textbooks on the subject.

4. CONTRÔLE DES TRAVAUX ET EXPLOITATION

4.1. POSITION DU PROBLÈME

Les diverses industries dans le monde produisant une grande variété de stériles, et deux sites n'étant pas absolument identiques, chaque barrage de stériles constitue un cas particulier. Aussi, n'est-il possible que de discuter de généralités et de donner des exemples caractéristiques.

4.1.1. Conditions climatiques

Un climat chaud et une faible humidité sont très propices à la construction du barrage. Les conditions climatiques étant imposées (ce sont celles existant à l'emplacement du site industriel), elles limitent le choix du type de construction possible. Dans la méthode de construction au moyen de bassins (enclos), il est nécessaire que le climat soit sec, avec, de préférence, un bon rayonnement de la chaleur solaire. Dans les climats froids, humides, lorsque les stériles sont utilisés comme matériau de construction, il peut être nécessaire de prévoir, de temps en temps, un remblai stabilisateur constitué de gravier ou d'enrochement.

4.1.2. Type de stériles

Il existe une grande variété de stériles ; cela va des solutions chimiques chaudes, qui se cristallisent en refroidissant et ne conviennent pas à la construction d'un barrage, à la roche broyée sous forme de sable anguleux présentant d'excellentes propriétés de résistance, de déformation et de drainage. Compacté, ce sable constitue un excellent matériau pour la construction du barrage. Il existe des barrages de retenue d'eau, constitués de résidus de sables provenant des industries minières.

Le plus grand volume de stériles est produit par les industries minières métallifères et se présente généralement sous la forme de roche concassée qui a été broyée jusqu'aux dimensions des catégories sable et silt, couvrant une plage de 2 mm à 0,0005 mm. Du fait du broyage récent et de la forme anguleuse des particules, le matériau a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des sables et des silts naturels de même granulométrie. Lorsque le matériau est bien compacté, il peut constituer un remblai très résistant.

Des solutions chimiques et autres stériles de cette nature, de consistance liquide, sont parfois stockés derrière des barrages constitués de remblai d'emprunt, qui sont identiques aux barrages traditionnels créant des retenues d'eau. On examinera essentiellement les barrages constitués principalement de stériles de la catégorie granulométrique sable argileux-silteux, provenant d'une roche mère acceptable.

4. CONSTRUCTION CONTROL AND OPERATION

4.1. GIVEN CONDITIONS

Variations in the types of tailings produced by the wide variety of industries in the world and the fact that no two sites are exactly the same, makes every tailings dam an individual. It is only possible, therefore, to discuss generalities and consider typical examples.

4.1.1. Climatic conditions

Warmth and low humidity can be a great assistance in dam construction. Since there is no choice (the climate relating to the location of the industry) it can limit the type of construction that is practicable. For successful paddock type construction, a dry climate, preferably with good radiant heat from the sun, is a prerequisite. In cold, wet climates, when the tailings are used as the construction material, some additional stabilising fill, such as gravel or rockfill may be required from time to time.

4.1.2. Type of tailings

The range of tailings produced is diverse; from hot chemical solutions, which crystallize out on cooling and are of no use for dam construction, to crushed rock in the form of a sharp sand that has excellent strength, deformation and drainage properties. When compacted it can form a very strong dam building material. There are examples of water retaining dams that have been built from waste sand from the mining industry.

The greatest volume of tailings is produced by the metal mining industry and is usually in the form of crushed rock that has been ground down to the sand and silt sizes, covering a range of about 2 mm to 0.0005 mm. The freshly broken, sharp nature of the particles gives the material strength characteristics superior to those of natural sands and silts of the same grading. When the material can be well compacted, it can form a very strong fill.

Chemical solutions and other liquid tailings of that nature may have to be retained by dams made from borrowed fill that are similar to traditional dams used for water storage. Our main concern will be with dams built mainly from tailings composed of particles in the clayey-silty sand size range derived from a competent parent rock.

4.2. OUVRAGES DE DÉCANTATION (VOIR CHAPITRE 2.2.6.)

Parmi les premières tâches à accomplir sur un nouveau site, lors de la préparation des fondations pour le barrage, figurent la préparation de la fondation et la construction de l'ouvrage de décantation ou du déversoir, (types d'ouvrage décrits au chapitre 2.2.6.), si un tel dispositif est nécessaire. Souvent, on préfère une station de pompage flottante.

4.2.1. Tour verticale et conduite sous remblai

L'emplacement de la tour et la longueur de la conduite seront indiqués sur les plans de projet. La fondation de la tour devra être étudiée de façon à réduire au minimum les tassements sous le poids de la tour à sa hauteur totale, en tenant compte de la force résultant du frottement négatif des stériles sur la paroi de la tour lors de leur tassement. Des tours spéciales compressibles réduiront les charges sur les fondations. Les sols mis à jour au cours des fouilles seront comparés avec les résultats déduits des reconnaissances sur le site, et toutes les différences seront signalées au projeteur de façon à définir la profondeur et les dimensions des fouilles avant mise en place du béton.

La conduite, qui fréquemment passe sous le barrage, sera installée en tranchée, souvent sur toute sa hauteur, afin de réduire la pression exercée par les stériles et le barrage. Des joints seront prévus sur la conduite afin de lui permettre, en toute sécurité, une légère flexion sous l'effet des tassements dus aux charges verticales du barrage et de la retenue de stockage, ainsi qu'un allongement sous l'effet des sollicitations horizontales. Comme pour la fondation de la tour, les caractéristiques du sol déduites des fouilles de la tranchée seront comparées avec les résultats fournis par les reconnaissances sur le site pour préciser la profondeur des fouilles. Lorsqu'une roche dure se trouve près de la surface, il peut s'avérer économique de ne pas réaliser la tranchée à la profondeur totale, mais, dans ce cas, la conduite devra être calculée pour supporter les charges supplémentaires.

4.2.2. Coursier sur le versant de la vallée et conduite d'évacuation

S'il existe à l'amont du barrage un versant de vallée parfaitement stable, on peut adopter un coursier en pente au lieu d'une tour verticale. Le coursier est réalisé en tranchée, dans un plan vertical, sur le versant naturel de la vallée, avec la forme d'un U (Fig. 17).

Il n'est pas nécessaire que l'ouvrage de pied, assurant la liaison entre le coursier et la conduite d'évacuation, soit massif comme dans le cas d'une tour verticale ; en effet, le coursier en pente, qui sera solidement fondé sur le versant de la vallée, transmettra peu de charge à cet ouvrage de liaison.

4.2.3. Conduite allongée progressivement

Dans les petits aménagements en vallée, on peut, à la place d'une tour ou d'un coursier, faire remonter la conduite sur le versant de la vallée (ancien lit de ruisseau) et l'allonger au fur et à mesure de la montée de la retenue de stériles. L'implantation de la conduite dans une tranchée présente certes une plus grande :

4.2. DECANT ARRANGEMENTS (SEE SECTION 2.2.6.)

Amongst the first tasks to be carried out on a new site, while preparing foundations for the dam, is that of foundation preparation and construction of the decant or overflow spillway systems, of the types described in Section 2.2.6, if such a systems are to be used. Often a pump barge may be preferred.

4.2.1. Vertical tower and culvert

The position for the tower and length of culvert will be shown on the design drawings. The tower foundation must be designed to minimise settlements under the weight of the future full height of tower, with an allowance for any downdrag caused by negative skin friction under the action of the settling tailings. Special compressible towers will reduce foundation loads. The soils revealed during the excavation must be compared with the type and depth obtained from the site investigation, and any variation discussed with the designer, to reach agreement about the depth and size of the excavation before any concrete is placed.

The culvert, which frequently passes under the dam, should be placed in trench, often to its full height to reduce the crushing pressure imposed by the tailings and the dam. Joints in the culvert should be designed to allow it to safely bend slightly due to settlements caused by the vertical loading from the dam and impoundment, and also to be elongated by horizontal strains. As for the tower foundation, the findings from the trench excavation must be compared with the assumptions made from the site investigation and agreement reached on the final depth. When hard rock is near the surface, it may not be economic to excavate the full depth of the culvert, but the culvert will have to be designed to withstand the additional loadings that will be imposed on it.

4.2.2. Valleyside chute and culvert

When there is a valleyside upstream of the dam that is completely stable, it may have been decided to use a sloping chute instead of a vertical tower. It is constructed in trench on a vertical plane, on the natural slope of the valley, in the form of a U, as indicated in Fig.17.

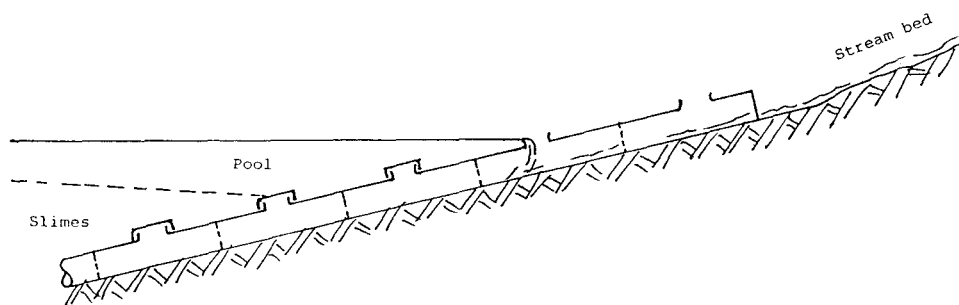
The foundation structure, where the duct joins the culvert, does not need to be as massive as that for a vertical tower because very little weight should be transferred to it from the sloping chute, which should be securely founded in the valley side.

4.2.3. Extended culvert

With smaller schemes in a valley, in place of a tower or duct, the culvert may be carried up the sloping floor of the valley (old streambed) and extended as the impoundment rises. While it is safer to bury the culvert in trench, when the designed maximum height of the dam is not too great, a pipe may have been chosen,

sécurité ; cependant, lorsque la hauteur du barrage n'est pas trop grande, on peut choisir un tuyau (Fig. 20). Le tuyau est généralement implanté en tranchée lorsqu'il passe sous le barrage, pour réduire la pression verticale à laquelle il est soumis ainsi que les contraintes horizontales résultant des déformations normales du barrage.

Plus loin du barrage, là où la hauteur des stériles stockés au-dessus du tuyau est plus faible, il peut être moins enterré, jusqu'à ce que les autres tronçons, mis en place avant la montée des stériles, soient simplement posés sur une bande de terrain décapé.



4.2.4. Pompe flottante

Un inconvénient de la tour et du coursier en pente est que le point de décantation reste à une distance fixe du pied du barrage. Cela peut gêner la mise en œuvre des dispositions prévues pour le dépôt initial des stériles, ainsi que les opérations ultérieures de construction du barrage et de stockage des stériles dans la retenue. Des pompes flottantes pour l'évacuation de l'eau de la retenue présentent une plus grande souplesse.

À la différence des ouvrages de décantation fixes, la capacité des pompes peut être modifiée pour s'adapter aux conditions réelles, au fur et à mesure que le volume de la retenue de stockage et la hauteur du barrage augmentent. Le retour de l'eau à l'usine nécessite moins d'énergie que son pompage depuis le pied du barrage.

Les pompes et les tuyaux d'évacuation sont toujours accessibles, de sorte que les difficultés susceptibles de survenir par suite de l'écrasement ou de l'obturation d'une conduite, ou de fuites résultant de dégâts provoqués par des tassements différentiels, sont éliminées. Des dispositifs non flottants, de fonctionnement sûr, sont nécessaires pour éviter tout dysfonctionnement qui pourrait résulter d'un échouage de la barge.

En outre, le lieu de décantation peut être déplacé à volonté, ce qui permet de situer la retenue d'eau au meilleur endroit pour le dépôt des stériles et la construction du barrage.

as indicated by Fig.20. It is usual to place the pipe in trench where it passes under the dam, to reduce both the vertical pressure that will act on it and horizontal strains that could be imposed by the normal movements of the dam.

Further away from the dam, as the height of the impounded tailings above it will be less, the depth of the embedment may become less, until the additional pipes, positioned in advance of the rising tailings, may be laid on a simple bedding on to a strip of cleared ground.

Fig. 20

Extended culvert decanting arrangement

Conduite de décantation allongée progressivement

Stream bed
Pool
Slimes

*Lit du ruisseau
Retenue d'eau
Stériles*

4.2.4. Pump barge

A disadvantage of both the tower and the sloping chute is that the decant point will remain at a fixed distance from the toe of the dam. This can inhibit the arrangements made for the initial deposition of tailings and subsequent management of dam construction and impoundment control. Much greater flexibility is afforded by the use of barge mounted pumps to remove the supernatant water.

Unlike fixed decanting arrangements, the rate of discharge, and the capacity of the pumps, can be altered to suit the conditions that are found in practice, as the impoundment increases in size and the dam is built higher. Returning supernatant water to the plant requires less energy than if it was pumped from the dam toe.

The pumps and pipework are always accessible, so that the potential difficulties that can arise due to crushing or other blockage in a culvert, or leakages caused by differential settlement damage is eliminated. Fail-safe 'no float' arrangements are required to avoid blockage that would be caused if the barge grounded.

Furthermore, the decant position can be changed at will, so that the pool of supernatant water can be developed at the position most advantageous to the deposition of tailings and construction of the dam.

4.3. DRAINAGE INTERNE

Ce drainage peut revêtir diverses formes, et les principes de conception ont été examinés dans le Bulletin n° 97 (1994) « Barrages de stériles - Conception du drainage ».

En général, le milieu drainant doit être protégé contre le risque de colmatage par des matériaux fins, de façon que l'eau puisse s'écouler dans le dispositif de drainage sans transport d'éléments fins. La granulométrie du matériau filtrant mis en place présentera des pores suffisamment petits pour empêcher l'entrée des particules fines du matériau à protéger, et des éléments suffisamment gros pour que ceux-ci ne puissent être entraînés avec l'eau dans les drains ou le tapis drainant. Un filtre multicouche est parfois nécessaire, la granulométrie de chaque couche successive augmentant.

Lorsqu'un tapis drainant doit être mis en place au niveau de la fondation, le sol est décapé jusqu'à la profondeur requise et recouvert de la première couche de filtre d'épaisseur adéquate. Théoriquement, une couche mince suffit à prévenir la perte de matériau fin, mais, en pratique, une épaisseur minimale de 0,3 m sera adoptée pour le filtre mis en place par engins. On veillera à assurer la continuité de la couche ; si le terrain sous-jacent est relativement mou et que les engins à roues y forment des ornières, celles-ci doivent être comblées avec des matériaux filtrants jusqu'au niveau de la couche filtrante adjacente. Les surfaces ne seront pas préparées trop en avance par rapport à la mise en place du remblai sus-jacent, car le passage répété d'engins sur une couche de filtre peut la détériorer rapidement. Une surveillance attentive est nécessaire pendant toute la période de mise en place de la couche de drainage. En effet, des défauts de construction ne peuvent pas être réparés une fois la couche enterrée par la construction du barrage et la mise en dépôt des stériles dans la retenue.

Lorsque le drain est constitué de tuyaux perforés ou avec fentes et que le matériau filtrant est mis en place à la main, l'épaisseur des couches entourant le tuyau peut être réduite à 0,15 m. Le matériau filtrant grossier est placé contre le tuyau, avec des couches de filtre de plus en plus fin jusqu'à la granulométrie appropriée assurant la protection du sol ou des stériles au contact du filtre.

La granulométrie d'un filtre comprend généralement plusieurs dimensions de particules et il y a risque de ségrégation au cours du transport, du déchargement et de l'épandage. La granulométrie sera étudiée pour minimiser ce risque, celui-ci étant encore réduit en adoptant pour le matériau filtrant une teneur en eau d'environ 5 % (poids de l'eau/poids du sol sec) et en déchargeant le matériau sur de faibles hauteurs. Les forces de ménisque dans le matériau granulaire humide contribuent à réduire le mouvement libre des particules, et donc la ségrégation.

Après déchargement et épandage, les couches de filtre seront compactées, au moyen d'un rouleau lisse vibrant, à une densité relative d'au moins 70 %, avant mise en place de la couche drainante constituée de matériaux grossiers. Cette dernière couche sera, à son tour, compactée au rouleau vibrant pour réaliser une surface unie destinée à recevoir les couches supérieures de filtre, qui seront également compactées avant mise en place des premières couches de remblai du barrage ou de stériles. Des géotextiles et des géocomposites peuvent, dans certains cas, être utilisés comme drains.

4.3. UNDER DRAINAGE

This can take many forms and principles have been discussed in Bulletin No.97 (1994) 'Tailings dams: Design of Drainage'.

In general, the drainage medium has to be protected against clogging by fine materials so that water can flow into the drainage system without carrying particles of fine material with it. The grading of the filter material is designed so that, when placed, its pore spaces will be small enough to prevent entry of particles of the fine material that it is to protect, while its own particle sizes are large enough not to be carried with the water into the drains or drainage layer. More than one thickness of filter material may be required, each successive layer increasing in particle size.

Where a drainage blanket is to be used at formation level, the ground is stripped to the required depth and the first filter layer spread evenly over it to the required thickness. In theory a thin layer is sufficient to prevent loss of fine material, but in practice a minimum thickness of 0.3 m should be used for filter material spread by machines. Great care must be used to ensure continuity of the layer and if the underlying ground is soft enough to permit ruts to be formed by any wheeled machines, these must be completely filled with filter material and brought up to the level of the surface of the adjoining filter layer. Areas should not be prepared too far in advance of the placement of overlying fill because a filter layer can easily be damaged by machines repeatedly passing over it. Detailed inspection is required during the whole operation of placing the drainage layer to ensure satisfactory performance. Imperfections left during construction cannot be rectified once the layer has been buried by construction of the dam and impoundment.

When drainage is to be achieved using perforated or slotted pipes and where the filter material is placed by hand, the thickness of surrounding layers can be reduced to 0.15 m. The coarsest filter material is placed next to the pipe, with successive layers of finer filter material until the appropriate size for the soil or tailings protection is placed in contact with the soil or tailings.

The designed grading of a filter material usually contains several sizes of particles and there can be a risk of segregation during transportation, placing and spreading. The grading will have been designed to minimise this risk, but it can be further reduced by handling the filter material at a water content of about 5% (wt.water/dry wt.) and avoiding high falls when placing. The meniscus forces in the damp granular material helps to reduce free movement of particles in relation to each other, thereby helping to reduce segregation.

After placement and spreading, the filter layers should be compacted by a vibrating smooth roller to a relative density of at least 70% before the drainage layer of coarser material is placed. This, in turn, should be compacted by the vibrating roller to produce a smooth surface to accept the upper layers of filter material, which are also compacted prior to placing the first layers of the dam building fill or tailings. Drainage geotextiles and composite sheets can be used in some circumstances.

4.3.1. Nécessité de recueillir les eaux de percolation

Lorsque les percolations traversant le remblai ne sont pas acceptables, on aménage généralement un bassin de récupération, l'eau retenue étant, soit traitée, soit retournée, par pompage, dans le réservoir par-dessus le remblai. S'il est absolument exclu de laisser l'eau associée aux stériles s'infiltrer dans le sol, les stériles ne seront pas utilisés comme matériaux de construction (comme dans les types D à F), à moins que n'existe ou ne soit constituée une fondation imperméable (et suffisamment résistante).

Un organe d'étanchéité associé à un drainage peut être adopté, si nécessaire, pour empêcher que l'eau de percolation provenant d'une retenue de stockage de dimensions moyennes ne pénètre dans la nappe phréatique. Un tapis étanche unique, en argile ou matériau synthétique, comportant au-dessus un dispositif de drainage, est parfois incorporé entre les stériles et le terrain naturel. Dans certains cas, on adopte un double tapis d'étanchéité, avec un organe de drainage intercalé entre les deux couches. Au cours de l'installation, un lestage est nécessaire pour empêcher que des bulles d'air ne soulèvent la membrane d'étanchéité. L'eau de drainage doit être recueillie avec soin et traitée afin de réduire sa toxicité à un niveau acceptable avant évacuation. Le coût de tels dispositifs peut être prohibitif pour de grandes retenues de stockage.

Lorsque les produits chimiques toxiques, déversés dans la retenue de stockage, sont dégradables, la meilleure solution consiste à stocker l'eau dans la retenue pendant un temps suffisamment long pour que la dégradation puisse s'opérer. Dans ce cas, il faudra éviter que des produits non dégradés ne sortent de la retenue.

4.3.2. Revêtement artificiel étanche

Dans les rares cas où un revêtement total est nécessaire pour empêcher des fuites de liquide de la retenue de stockage, on adopte généralement un barrage de type C. Les reconnaissances du site indiqueront si des pressions d'eau artésienne existent sous le site. Si c'est le cas, il peut s'avérer nécessaire de prévoir un drainage sous le revêtement pour éviter la formation de pressions excessives ultérieurement. Un tel drainage contribuera également à la dissipation de l'air, comme indiqué ci-après.

Outre la mise en place, le cas échéant, d'un dispositif drainant, la préparation du sol pour le revêtement nécessite l'enlèvement de la végétation et le passage d'un rouleau lisse pour réaliser une surface unie. Il est recommandé qu'une entreprise spécialisée intervienne pour la fourniture et la pose du revêtement. La membrane imperméable est fabriquée sous forme de bandes de largeur manipulable, qui sont livrées en rouleaux au site. Les bandes adjacentes sont soudées entre elles et les joints vérifiés lors de la pose ; elles sont ensuite chargées pour éviter leur soulèvement par le vent, l'air et, parfois, le méthane piégés. Une méthode d'essai courante consiste à utiliser une machine à souder mobile qui réalise deux soudures côte à côte. L'étroite « poche » formée entre les soudures est soumise à une pression d'air pour vérifier qu'il n'y a pas de fuite de l'une ou l'autre soudure. La membrane mise en place sur la zone inférieure de la retenue est généralement recouverte d'eau pour la maintenir en place jusqu'au déversement des boues de

4.3.1. Need for seepage collection

Where seepage water from the embankment is unacceptable a reclaim reservoir is normally provided and the detained water is either treated or pumped back over the embankment into the impoundment. If the water delivered with the tailings is such that it can not be allowed to seep into the ground under any circumstances, the use of tailings as a construction material, as in types D to F, may need to be excluded unless impermeable (but sufficiently strong) foundations exist or can be created.

When necessary, the prevention of seepage from an impoundment of moderate size into the ground water, can be effected by a combination of sealing and drainage. A single sealing blanket of clay or synthetic material may be provided at the interface between the tailings and the natural ground with a drainage system incorporated above the blanket. In some circumstances a double sealing layer is provided with a drainage system inserted between them. During installation, weighting is necessary to prevent air bubbles lifting the sealing membrane. The drainage effluent has to be carefully collected for treatment to remove toxicity to reduce it to acceptable levels before the liquid can be discharged. Such arrangements can be prohibitively expensive for large impoundments.

Where the toxic chemical discharged into the impoundment is degradable, the appropriate solution may be the detention of the water in the impoundment for a sufficient length of time for the material to break down. In this situation it will be necessary to ensure that the passage of water through the impoundment is controlled to avoid short circuiting of undegraded chemical.

4.3.2. Impervious artificial liner

In the rare cases where a complete lining is needed to prevent escape of liquid from the impoundment, a dam of type C is usually required. Information from the site investigation will have shown if artesian water pressure exists below the site. If this should occur during the yearly cycle, it may be necessary to provide drainage under the lining to avoid excessive build up of pressure at later stages. Such draiage can help to remove air, as discussed below.

Preparation for the liner requires stripping of vegetation and smooth rolling, in addition to placing any necessary drainage channels, to provide a smooth surface. It is recommended that a specialist firm be engaged to supply and lay the sheet lining. The impervious sheet is usually manufactured in strips of manageable width, which are delivered to site as rolls. Adjoining sheets have to be welded together and the joints tested as they are laid, then weighted to prevent lifting by wind, trapped air and possibly methane. A common testing method is by using a portable welding machine that produces two welds, side by side. The narrow 'pocket' formed between the welds is tested by air pressure to check that there is no loss from either weld. Once a cover over the lower part of the impoundment area has been completed, it is usually flooded to hold it in position until tailings slurry begins to be discharged on to it. It is impossible to lay the sheets in complete contact with the ground and during flooding, the trapped gas (air plus sometimes

stériles. Il est impossible d'assurer un contact parfait des bandes avec le sol et, pendant la submersion, le gaz piégé (air, plus parfois méthane) forme des dômes, appelés couramment « dos de baleine », qui émergent de l'eau. Il y a lieu de marcher dans l'eau ou d'utiliser une barque pour aller percer ces dômes afin que les gaz s'en échappent. Les petits trous qui en résultent, lorsqu'ils sont appliqués fortement contre le sol, laissent passer une quantité négligeable d'eau, en particulier lorsqu'ils seront recouverts de stériles. Ce problème peut être résolu en utilisant une couche drainante sous toute la surface, permettant à l'air et aux gaz de s'échapper ; mais c'est une solution assez coûteuse, qui est cependant exigée par certains concepteurs n'acceptant pas le perçage de la membrane.

4.3.3. Puits filtrants

Les écoulements souterrains peuvent être interceptés au moyen de lignes ou de groupes de puits filtrants. Ceux-ci sont généralement des forages dans lesquels on place des tubes crépinés, entourés de matériau filtrant de granulométrie appropriée empêchant les matériaux du terrain naturel de pénétrer dans les puits. Ils contiennent une pompe submersible, mise en marche automatiquement par un flotteur pour maintenir le niveau d'eau au-dessous d'une hauteur donnée. La profondeur et l'espacement de ces puits sont déterminés lors du projet, mais on peut aussi en installer comme mesures correctives.

Le projet et l'exploitation des puits de décharge ou des puits avec pompage doivent être étudiés avec soin par des hydrologues-experts, afin de minimiser leurs effets sur les niveaux de la nappe phréatique.

4.3.4. Mesure des débits de percolation

Les débits de percolation peuvent changer suivant la cadence de mise en dépôt des stériles, les variations du niveau d'eau dans la retenue, les chutes de pluie et la fonte des neiges ; mais des changements inhabituels sont souvent la première indication d'une modification du comportement du barrage. Les mesures précises et continues des débits de percolation font partie du dispositif d'auscultation d'un barrage de stériles et permettent d'avertir de changements nécessitant une modification de la méthode de construction ou la mise en œuvre de mesures correctives.

Les débits sortant d'un tapis drainant ou de puits filtrants peuvent être acheminés vers des bassins de collecte en béton où ils sont mesurés au moyen de déversoir en V. Lorsque des tuyaux perforés ou avec fentes sont utilisés, les débits sont recueillis dans plusieurs bassins, de sorte que différentes zones du remblai peuvent être contrôlées séparément.

Chaque déversoir en V est parfois équipé d'un dispositif de mesure automatique identique à celui représenté sur la Fig. 21. La variation du niveau d'eau modifie la charge s'exerçant sur la console calibrée. Les capteurs électriques sont reliés à une salle de contrôle où toutes les lectures des appareils sont enregistrées. Les débits sur les seuils en V seront enregistrés à des intervalles réguliers et fréquents.

methane) forms domes, commonly called “whale backs” that rise out of the water. It is usual to wade in or use a small boat and puncture these domes to let the gas escape. The resulting small holes, when pressed tightly against the ground, allow only negligible amounts of liquid to pass, particularly when they are covered by tailings. This problem can be overcome by use of a drainage layer under the whole area, to let air and gases out, but it is a rather expensive solution, although required by some planning authorities who will not accept piercing.

4.3.3. Filter wells

Ground water flows can be intercepted by lines or groups of filter wells. These are usually placed in boreholes and consist of slotted tubes surrounded by filter material of a grading suitable to prevent material from the natural ground from being carried into the wells. They contain submersible pumps, operated automatically by float switches to keep the water level below a designed depth. The depth and spacing of these wells may have been determined during design, but they can also be installed as a remedial measure.

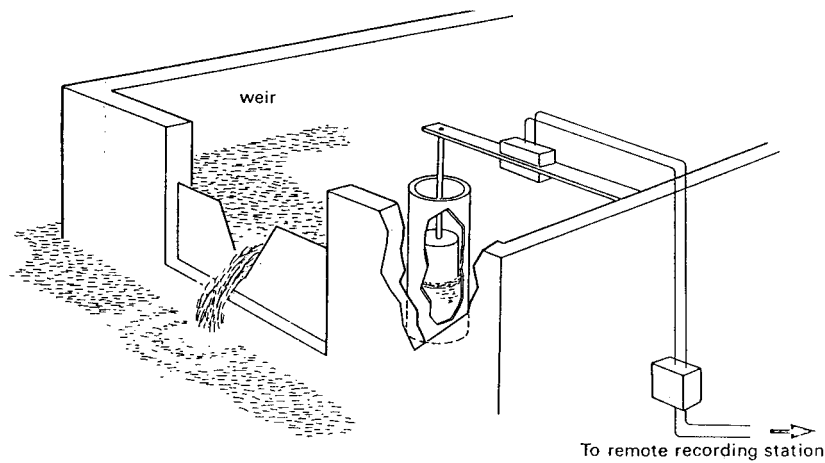
The design and operation of relief wells or pumped dewatering wells must be carefully undertaken by hydrological experts to minimise the effect on regional groundwater levels.

4.3.4. Seepage measurement

Changes in seepage flow may be caused by variations in the rate of deposition of tailings, variation in pool level, the result of rainfall and snowmelt, but unusual changes are often the first indication of a change of behaviour of the dam. As part of the monitoring of the behaviour of a tailings dam and to obtain early warning of changes that may require alteration to the method of construction or indicate the need for remedial measures, accurate and continuous measurement of seepage flow is required.

Flows from a drainage blanket and below ground filter wells can be channelled to concrete collecting basins and the flows from the basins measured by Vee notch weirs. When perforated or slotted pipes are used, the piped discharges can be grouped into several basins so that different sections of the embankment can be monitored separately.

The flow over each Vee notch weir can be measured automatically by an arrangement similar to that shown by Fig. 21. Change of water level changes the load on the calibrated cantilever. The electrical strain gauges are connected to a central control room where all instrument readings are recorded. The flow over the Vee notch weirs should be recorded at regular, frequent, intervals.



4.4. REMBLAI D'AMORCE

La qualité des matériaux utilisés dans la construction d'un remblai d'amorce, le niveau d'exécution requis et la préparation de la fondation dépendent du type de barrage de stériles à construire. En général, le but principal d'un remblai d'amorce est de retenir les premiers stériles mis en dépôt. Sa hauteur, déterminée au cours des études de projet, dépend de la nature des stériles et de la forme de la retenue de stockage. Dans la construction par la méthode des bassins (enclos), des diguettes sont suffisantes pour retenir la première couche de stériles qu'on laisse sécher et qui constituera la première couche de construction du barrage. Dans la construction par la méthode amont, dans une vallée étroite, et particulièrement si les stériles contiennent une quantité limitée de matériaux grossiers convenant à la construction du barrage, une hauteur importante est nécessaire pour obtenir une capacité suffisante de retenue permettant de stocker toutes les boues. Afin d'éviter la formation d'une poche de boues, constituant une zone de faible résistance sur une ligne de glissement potentiel lorsque le barrage aura atteint une grande hauteur, et afin de réduire le risque d'obstruction du tapis drainant de fondation, on prolongera le pied amont du remblai d'amorce vers l'amont, comme indiqué dans le Bulletin 97. La surface de cette « langue » a une pente transversale de 1,5 % environ afin d'amorcer la plage. Les stériles déversés sur cette « langue » amont du remblai d'amorce s'écoulent en déposant les matériaux grossiers, puis les matériaux fins, les boues très fines s'écoulant au-delà pour se déposer dans un bassin, amorçant ainsi la zone de dépôt. Cette conception du remblai d'amorce a fait l'objet d'un brevet en Bulgarie (mais non ailleurs) et a été décrite par Abadjiev (1985b).

4.5. CONSTRUCTION PAR LA MÉTHODE AMONT

4.5.1. Formation de la plage

Les stériles déversés par des buses ou des rampes d'aspersion au-dessus de la « langue » amont du remblai d'amorce déposeront leur fraction grossière au cours

Fig. 21

Automatic recording of seepage flows

Enregistrement automatique des débits de percolation

Weir
To remote recording station

Seuil de mesure
Vers la station d'enregistrement à distance

4.4. STARTER DAM

The quality of materials used in the construction of a starter dam, the standard of workmanship required and the preparation of its foundation are dependent on the type of tailings dam to be built. In general the main purpose of a starter dam is to contain the initial placement of tailings. Its height, which will have been determined at the design stage, depends on the type of tailings and the shape of the impoundment. For paddock construction, relatively low mounds are sufficient to contain the first thin layer of tailings, which is allowed to dry and will form the first layer of dam construction. For upstream construction in a narrow valley, and particularly if the tailings contain a limited amount of the coarse material suitable for dam construction, a considerable height may be needed to obtain an impoundment of sufficient capacity to accept all the slimes. To avoid the formation of a pocket of slimes, that would form a weak zone on the path of a potential slip surface when the dam is high, and to reduce blinding of the foundation drainage blanket, the starter dam should have an extended toe, as described in Bulletin No.97. The upper surface of this toe is sloped at about 1.5% as a start for the beach. Tailings discharged on to it flow down, depositing coarse then finer material, the finest slimes flowing off it to settle in a pool, so beginning the impoundment. This design of starter dam has been patented in Bulgaria (but not elsewhere) and was described by Abadjiev (1985b).

4.5. UPSTREAM CONSTRUCTION

4.5.1. Development of the beach

Tailings discharged through spigots or spray-bars on to the top of the extended toe of the starter dam, will deposit their coarse fraction as they spread down

de leur écoulement vers la retenue de stockage des boues, amorçant ainsi la zone de matériaux grossiers constituant le barrage.

Lorsque les stériles contiennent une grande quantité d'éléments grossiers, une « langue » peut être constituée en construisant une banquette de terre à quelque distance du remblai d'amorce, formant le début de la zone de dépôt des boues. Des hydrocyclones mobiles sont utilisés pour obtenir les matériaux grossiers des stériles, ces matériaux remplissant la zone entre les deux digues et formant la « langue » prolongeant le remblai d'amorce.

L'application de cette méthode dépend de la forme de la vallée, ainsi que du rapport matériaux grossiers/matériaux fins des stériles. Si le fond de vallée a une forte pente à l'amont, le volume des matériaux grossiers des stériles est parfois insuffisant pour permettre une montée plus rapide de leur niveau que celle du niveau des boues. Lorsqu'il y a d'autres barrages de stériles dans la zone, on peut faire des emprunts de matériaux grossiers pour ce début de construction. La digue en terre sera construite sur un tapis drainant qui se prolongera sous la retenue de stockage des stériles.

Si l'on permet aux buses, supportées par des chevalets provisoires en bois, de déverser au-dessus de la plage sur une hauteur importante, la cascade creuse une fosse sur la plage jusqu'à la constitution d'un petit bassin de dissipation de l'énergie ; un chenal se forme parfois sur la plage, acheminant la plus grande partie des stériles vers la retenue de boues - seuls quelques matériaux grossiers se déposent sur le fond et les bords du chenal.

Une méthode plus efficace consiste à utiliser des rampes d'aspersion. Dans leur forme la plus simple, il s'agit de tuyaux perforés fixés à l'extrémité des buses (Fig. 13), desquels sortent de nombreux jets de stériles tout le long de la plage en cours de formation. En disposant les rampes près de la plage, la hauteur de chute des stériles est faible et les rigoles creusées sont très petites ; il y a formation d'une nappe de stériles qui s'écoule lentement sur la largeur de la plage, donnant ainsi le temps aux particules grossières de se déposer, seuls les éléments très fins (catégorie « argile ») étant transportés par l'eau jusqu'à la retenue. Un tel dispositif nécessite une attention soutenue : surélévation fréquente des rampes d'aspersion par petits paliers, réglage des longueurs de déversement sur la plage. On laisse aux zones ne recevant pas de déversement un temps suffisant pour sécher, par drainage et évaporation si les conditions climatiques sont favorables. Cette méthode conduisant au dépôt maximal de matériaux grossiers sur la plage, l'accès sur celle-ci, après un certain temps de séchage, est possible au moyen d'engins de terrassement sur larges chenilles.

Pour assurer un accès sur la plage, on peut constituer, au moyen d'un engin, des bandes de matériaux grossiers - en forme d'antenne - sur une certaine distance. Ces bandes sont parfois formées également en déposant un rameau depuis la conduite principale d'alimentation, à travers la plage, et en déversant par les buses et les rampes d'aspersion pour constituer des plages auxiliaires transversalement à la plage principale. De telles bandes, non seulement permettent l'installation de matériel pour des essais in situ et des prélèvements d'échantillons, mais contribuent également au drainage.

Dans certains cas, la construction de la plage peut être améliorée en utilisant la méthode des bassins (enclos). Ceux-ci sont construits le long de la plage au

towards the area in which the slimes pond will form, so beginning the zone of coarser material that will form the dam.

With tailings containing a large amount of coarse fraction, an extended toe can be constructed by throwing up an earth bank, at a distance some way upstream of a simple starter dam, to retain the initial slimes pond. Portable hydrocyclones are used to obtain coarser material from the tailings, to fill the area between, thereby forming the extended toe from this coarse sand fraction from the tailings themselves.

The feasibility of this approach depends both on valley shape and the ratio of coarse to fine material forming the tailings. If the valley floor slopes steeply upstream, it may not be possible to obtain sufficient volume of coarse material from the tailings to raise their level faster than that of the slimes pond. When there are other tailings dams in the area, it may be possible to borrow coarse material for this initial construction. The earth mound should be built over any underdrainage that is to extend under the tailings impoundment.

If spigots, supported on temporary wooden supports, are allowed to discharge from a significant height on to a beach, the energy of the landing cascade erodes a pool into the beach surface until it forms a miniature stilling basin to absorb the energy, and a channel sometimes forms across the beach, carrying the whole tailings toward the slimes pond. Some coarse material does settle out on the bed and sides of the channel, but much is carried into the slurry pond.

A more effective method is to use spreader bars. In their simplest form these are perforated tubes attached across the end of the spigots, as indicated in Fig. 13., so that tailings issue as numerous small flows along the whole operational length of the beach. By positioning the bars close to the beach, the fall of tailings is small, so that any channels are very small and the tailings soon merge into a sheet that spreads slowly down the width of the beach, giving maximum time for all the coarser fraction to settle out of the thin sheet, only the very finest, clay like particles being carried by the transportation water into the pond. Such an arrangement requires regular attention, frequently to raise the spreader bars by small amounts and to regulate the operational lengths on the beach. Non discharging areas are given maximum time to dry, by downward drainage and evaporation if the weather conditions are favourable. Because this method generates the maximum amount of coarse material on to the beach, after some drying, access on to the beach may be made by wide tracked earth moving machines.

To gain access over the width of the beach, fingers of coarse material may be pushed out by machine for a limited distance. Fingers can also be formed by laying a branch from the main delivery pipe, out across the beach and discharging from spigots and spreader bars to form subsidiary beaches, normal to the main beach. Such fingers not only give access for equipment to make in situ tests and take samples, but also assist with drainage.

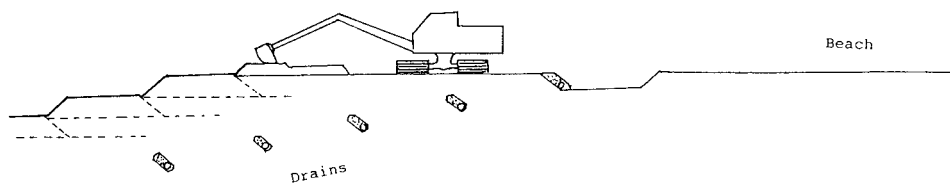
In some circumstances, beach construction can be improved by use of pad-docks. They are formed along the beach by small dykes, built from beach material

moyen de diguettes constituées des matériaux de la plage ; ils sont remplis, sur une faible profondeur, de stériles déversés par les rampes d'aspersion, l'excès de boues étant acheminé vers la retenue. Lorsqu'un bassin est plein, on passe au suivant, et ainsi de suite. De cette façon, un bassin a suffisamment de temps pour la sédimentation et le séchage par drainage et évaporation. La mince couche qui en résulte (épaisseur dépendant de la taille prédominante de particules ; plus le matériau est grossier, plus l'épaisseur utilisable est grande) peut alors subir un compactage par engins.

4.5.2. Construction des petites digues et des drains

Dans le passé, avant l'utilisation des engins de terrassement, maintenant courante, les crêtes des barrages construits par la méthode amont étaient surélevées à la main. Au-dessus d'une zone que l'on avait laissé sécher, des matériaux étaient prélevés à la pelle sur la plage pour constituer de petites digues le long de la crête. L'un des talus de cette petite digue formait le parement aval du barrage et sa position déterminait la pente de ce parement. De l'autre côté, la digue constituait une barrière contre les stériles déversés et les déviait vers l'amont de la plage, évitant ainsi qu'ils déversent sur le talus aval. Ces petites digues avaient seulement une hauteur de 0,30 m environ et leur construction nécessitait la présence continue d'une petite équipe d'ouvriers.

Aujourd'hui, des engins sur larges chenilles peuvent travailler sur une zone de plage non exploitée. Ces engins creusent une tranchée peu profonde (Fig. 22) et construisent une petite digue qui, dans les meilleurs conditions, atteint 1 à 2 m de hauteur. Cette digue est positionnée pour reproduire la pente du talus aval et peut être légèrement compactée au moyen du godet ou des chenilles de l'excavateur. Si des déchets d'enrochement ou d'autres matériaux granulaires sont utilisés (de préférence à la végétation) pour lutter contre l'érosion par le vent et le ravinement, un parement constitué de tels matériaux peut être réalisé sur les digues lors de leur construction. Des tuyaux de drainage longitudinaux sont parfois installés dans la tranchée peu profonde pour faire partie du dispositif de drainage principal prévu pour le barrage. Plusieurs schémas sont décrits dans le Bulletin 97. La construction des drains nécessite beaucoup de soin afin de garantir leur efficacité, car ils jouent un rôle capital dans la stabilité future du barrage et leur remplacement ultérieur est très coûteux.



4.5.3. Mesure des caractéristiques

Des échantillons des matériaux grossiers mis en dépôt seront prélevés sur toute la largeur de la plage, à des intervalles de l'ordre de 50 m, tant qu'il est possible de s'aventurer à pied vers la retenue de boues.

and filled to shallow depth with tailings applied through spreader bars, with surplus slimes directed from the lower end into the lagoon. When one paddock is full, tailings are supplied to the next and so on. In this way time can be given for a paddock to settle and dry by both downward drainage and evaporation. The resulting thin layer (thickness depending on the predominant particle size; the coarser the material, the greater the thickness that can be used) can then be compacted by machines.

4.5.2. Dyke and drain construction

In the early days, before the current general acceptance of earth placing machinery, the crests of dams built by the upstream method were raised by hand. Over a section that had been allowed to dry, material was shovelled up from the beach to form mounds along the crest. This mound, on one side constituted the downstream face of the dam, and its position determined the slope of the face. On the other side it acted as a small barrier against the discharged tailings, to ensure that they spread down the beach in an upstream direction, and not over the edge on to the downstream slope. These mounds were only made about 0.3 m high and their construction required continuous attention by a small construction gang.

Nowadays, wide tracked machines can work on a non-operational stretch of beach. They can be used to dig a shallow trench, as indicated in Fig. 22, and build a dyke, which in favourable conditions, can be 1 to 2 m high. It can be positioned to produce the required downstream slope, and can be lightly compacted by use of the excavator bucket or tracks. If waste rockfill or other granular material is to be used (rather than vegetation) to avoid wind erosion and gullying, a face of this material can be constructed on the dykes as they are built. Longitudinal pipe drains can be installed in the shallow trench, when they can form part of the main drainage system that has been designed for the dam. Several schemes are described in Bulletin No.97. The greatest care must be exercised in the construction of drains to ensure that they will be effective, because they play such a vital role in the future stability of the dam, and will be very expensive to replace at a later stage.

Fig. 22

Dyke construction

Construction des petites digues

Drains
Beach

*Drains
Plage*

4.5.3. Measurement of properties

Bulk samples of the coarse material deposited on the beach should be taken routinely at about 50 m intervals across the whole width of the beach, as far as it is possible to venture on foot, towards the slimes pond, wearing marsh pads.

A l'aide des engins travaillant sur la plage ou sur les bandes d'accès, des essais, tels que des essais au pénétromètre statique et au scissomètre, peuvent être effectués à la demande du projeteur ou de l'ingénieur responsable du contrôle des travaux. Ces essais permettent d'estimer la densité relative et la résistance au cisaillement in situ, à différentes profondeurs sous la plage. Des appareils de mesures seront aussi installés selon les nécessités.

Des échantillons peuvent être extraits, au moyen de carottiers à piston, de forages à la boue exécutés dans le barrage depuis la plage. Au fur et à mesure de la montée du barrage, la plage se déplace vers l'amont au-dessus des boues ; de cette façon, on peut prélever des échantillons des boues mises en dépôt précédemment, ce qui permet de mesurer leur degré de consolidation, leur composition et leurs paramètres de résistance.

4.6. CONSTRUCTION PAR LA MÉTHODE AVAL

4.6.1. Mise en dépôt sur le talus aval

Un remblai d'amorce, constitué de matériaux d'emprunt, est exécuté au pied amont du barrage construit par la méthode aval. Lorsqu'une installation fixe de cyclones sur le versant de la vallée est utilisée, la fraction grossière de stériles doit contenir suffisamment d'eau de transport pour permettre son écoulement dans la conduite principale de distribution posée le long de la crête du remblai d'amorce. Des embranchements sous forme de buses équipées de rampes d'épandage, ou des embranchements perforés, ont été utilisés pour distribuer les matériaux grossiers sur le talus aval du barrage. Un dispositif de drainage sur la fondation décapée recueillera l'eau de transport provenant des stériles qui se déposeront contre le talus aval du remblai d'amorce et formeront un talus aval dont la pente dépendra de la teneur en eau des matériaux mis en dépôt. Si la pente est plus douce que celle prescrite au projet, la teneur en eau peut être réduite ; mais si la quantité minimale d'eau de transport assurant l'écoulement des stériles grossiers dans la conduite conduit encore à un talus de pente trop douce, on doit laisser les stériles sécher et utiliser des engins pour obtenir la pente prescrite. L'utilisation d'hydrocyclones mobiles permet d'obtenir un débit de fond plus sec, du fait qu'il n'y a pas transport des matériaux grossiers dans une conduite, et on peut ainsi construire des talus plus raides.

Le talus est généralement fractionné en zones de travail. Une partie (la moitié, le tiers ou le quart) de la longueur totale de la crête est utilisée pour la mise en dépôt des matériaux grossiers pendant une période de temps donnée, tandis qu'on laisse la partie restante se drainer et sécher avant le réglage et le compactage. La mise en dépôt passe ensuite sur la section suivante. Les matériaux sont déposés suivant une épaisseur de l'ordre de 0,50 m et compactés en une seule fois.

4.6.2. Mesure des caractéristiques

Les densités relatives obtenues seront mesurées au moyen d'essais de densité in situ (substitution par de l'eau ou du sable) effectués à des espacements de 100 m environ, sur toute la surface, à chaque montée de 2 m du remblai. Les échantillons prélevés seront soumis à des essais en laboratoire (granulométrie et densité relative).

With the aid of machines working on the beach and on access fingers, tests such as cone penetration and vane boring can be made to the requirements of the designer or engineer responsible for the supervision of construction. These tests permit an assessment to be made of the relative density and in situ shear strength that has developed at various depths below the beach. Instrumentation may also be installed as required.

Samples may be obtained with piston samplers, from mud filled boreholes, made into the dam from the beach. As the dam height increases, so the beach moves upstream over the slimes and piston samplers can recover samples from the slimes, deposited previously so that the degree of consolidation, composition and strength parameters can be measured.

4.6. DOWNSTREAM CONSTRUCTION

4.6.1. Deposition on the downstream slope

A starter dam, constructed of borrowed fill, is built at the upstream toe for a proposed dam of downstream construction. When a permanent cycloning installation on the valley side is being used, the coarse fraction must contain sufficient transportation water to ensure it flows through the main delivery pipe line, laid along the crest of the starter dam. Branch connections in the form of spigots fitted with spreader bars or perforated branch connections have been used to distribute the coarse material on the downstream side of the dam. A drainage system covering the stripped foundation will absorb the transportation water draining from the deposited material, which will settle against the downstream face of the starter dam and develop a downstream slope dependent largely on the wetness of the deposited material. If the slope is flatter than the required design slope, the water content might be reduced, but if the minimum quantity of transportation water required to enable the coarse fraction to flow through the pipework, still causes the deposited slope to be too flat, it must be given time to dry, and the required slope obtained by use of machines. The use of portable hydrocyclones allows a drier underflow to be used, because the coarse fraction is not transported through pipework, enabling steeper slopes to be constructed.

The face is normally worked in sections. A proportion of the whole crest length, typically half, third or quarter, is used for deposition of the coarse material over a given time, while the remainder is allowed to drain and dry before being trimmed and compacted. Deposition is then moved along to the next section. Deposited thicknesses of the order of 0.5 m are placed and compacted at one time.

4.6.2. Measurement of properties

To check on the relative densities being achieved, a systematic routine of in situ sand, or water, replacement density tests should be made at about 100 m spacings over the whole face for every 2 m rise of fill. The bag samples obtained from each test are subjected to laboratory tests for grain size distribution and relative

ve). Le cas échéant, quelques échantillons feront l'objet d'essais en vue d'établir la relation entre densité et angle de cisaillement, et de comparer les résultats avec les hypothèses de projet.

4.7. CONSTRUCTION UTILISANT L'ASSÈCHEMENT DES STÉRILES

Les stériles de taille uniforme, par exemple les cendres volantes provenant des centrales thermiques au charbon, sont acceptables comme matériau de construction du barrage, lorsqu'ils peuvent être mis en place à la teneur en eau optimale par des engins de terrassement. Les cendres volantes sont recueillies à l'état complètement sec dans les centrales thermiques et sont humidifiées pour éviter les poussières ou pour leur transport par voie hydraulique.

On ajoute parfois de l'eau uniquement pour obtenir la teneur en eau optimale ; le matériau résultant est désigné sous le nom de « cendres volantes conditionnées ». Il est transporté par camions jusqu'au site du barrage, où il est déchargé, épandu en couches et compacté par engins comme dans le cas d'un barrage en terre. L'avantage d'un tel matériau est que sa teneur en eau est parfaitement contrôlée et qu'il est fourni, à tous moments, à la teneur en eau optimale de compactage.

Lorsque les centrales thermiques sont éloignées du site du barrage de stériles, et particulièrement lorsque les routes de liaison sont impraticables aux camions, les résidus de cendres volantes peuvent être transportés par conduite jusqu'au site où la teneur en eau des boues est réduite par des filtres.

Un séchage identique peut être appliqué à tous stériles afin de permettre leur compactage mécanique pour la construction du barrage. Pour de petits aménagements, cette méthode est également utilisable afin de stocker une plus grande masse de stériles sur un site de dimensions limitées.

4.7.1. Utilisation d'autres matériaux

L'utilisation de stériles à la teneur en eau optimale, tels que les cendres volantes précitées, est souvent limitée à la recharge aval d'un barrage conçu avec un organe semi-étanche, pour réduire le débit de percolation de l'eau de la retenue de stockage à travers le remblai aval. Les centrales thermiques au charbon sont souvent situées sur les bassins houillers et les mines de charbon peuvent produire des résidus de schiste houiller. Il y a des exemples de barrages de stériles, construits à partir de cendres volantes traitées et destinés à retenir des boues de cendres volantes, qui comportent un pseudo-noyau central vertical constitué de résidus de schiste houiller compacté. Le schiste houiller, mis en place et compacté en couches en même temps que les cendres volantes traitées, constitue un organe étanche vertical à l'amont de la recharge aval (Fig. 23). Il s'appuie à l'amont sur la retenue de stockage au fur et à mesure de sa montée, de sorte que ce « barrage », à la différence d'un barrage conventionnel à retenue d'eau, n'a pas de recharge amont.

density. Some samples, as may be required, are tested to establish a relationship between density and angle of shearing resistance, for comparison with design assumptions.

4.7. CONSTRUCTION USING DE-WATERING TAILINGS

Single sized tailings, such as those of pulverised fuel ash emanating from coal burning power stations, may form a perfectly satisfactory dam building material when they can be placed at an optimum water content by earth moving machinery. Fly-ash (pfa) is collected from the chimneys of coal burning power stations in a completely dry state and is wetted to avoid dust problems, or for hydraulic transportation.

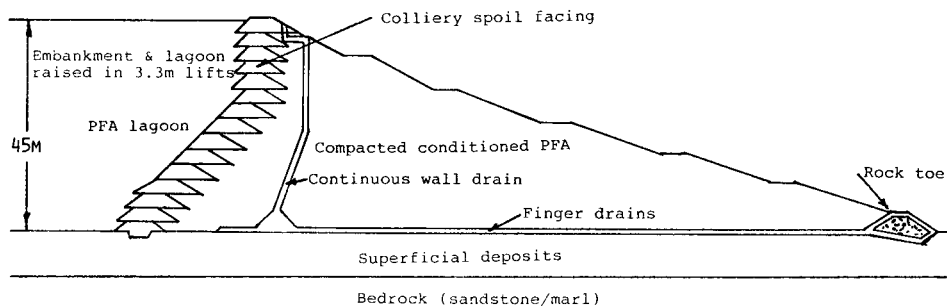
It is possible to add only enough water to produce an optimum water content and the resulting material is referred to as “conditioned pfa”. It is transported by lorry to the dam site where it is placed, spread in layers and compacted by earth moving machinery exactly as for earthfill construction. An advantage of this material is that the water content is completely under control and can be delivered at the optimum value for best compaction at all times.

When the power stations are some distance from the site for the tailings dam, and particularly when the roads between are considered to be unsuitable for the lorry traffic that would be required, the pfa tailings may have to be piped to the site. At the site, the slurry can be reduced in water content by suction filters.

Similar de-watering can be used with any tailings so that they can be machine compacted for dam building. For small schemes, this approach can also be used so that a greater weight of tailings can be stored on a site of limited size.

4.7.1. Introduction of other materials

Use of tailings material that has been provided at its optimum water content, such as the pfa discussed above, is often limited to the downstream shoulder of a dam that may be designed to have a semi-waterproof element, to limit the amount of water that can pass from the impoundment into the pores of the downstream fill. Coal burning power stations are often located on coalfields and the coal mines may have shale as a waste product. There are cases of tailings dams built from conditioned pfa, to retain impoundments of pfa slurry, that have used the equivalent of a central vertical core composed of compacted waste colliery shale. The shale, placed and compacted in layers at the same time as the conditioned pfa, forms a vertical waterproof element on the upstream side of the downstream shoulder, as shown in Fig.23. It is supported on the upstream side by the rising impoundment as construction proceeds, so that this “dam”, unlike a dam for a water storage reservoir, has no upstream shoulder.



4.8. PROTECTION DES TALUS

Les talus aval des barrages de stériles peuvent être sujets à l'érosion par le vent et l'eau. Il y a donc lieu de les protéger, suivant les conditions climatiques et le type de stériles. Une couverture végétale, des débris de roche ou des géotextiles sont couramment utilisés.

4.8.1. Débris de roche

Lorsque les stériles sont toxiques vis-à-vis de la végétation, ou que le climat ne permet pas la croissance de la végétation, les talus extérieurs peuvent être protégés avec des matériaux granulaires grossiers, tels que des débris de roche, à condition qu'ils ne contiennent pas de minerais d'où des métaux lourds et des acides pourraient être lessivés par les eaux de pluie, causant une pollution. La meilleure méthode consiste à incorporer des matériaux en cours de construction pour former les talus au moyen de petites digues constituées d'enrochement ou comportant une zone d'enrochement sur leur bord aval (voir chapitre 4.5.2.). En raison des difficultés de mettre en place, après achèvement, une couche d'enrochement sur un talus de stériles existant, de grande hauteur, il est moins coûteux de l'exécuter au cours des travaux du barrage.

4.8.2. Végétation

La mise au point de techniques spéciales a permis d'améliorer la croissance de la végétation sur les barrages de stériles. Diverses méthodes existent, par exemple, épandage d'un paillis contenant de la paille, des engrais et des graines de plantes. De la chaux sera appliquée si les matériaux déposés sont acides. La surface peut nécessiter une stabilisation provisoire au moyen d'un géotextile fixé par des piquets pour éviter son soulèvement par le vent. Un arrosage régulier d'eau pulvérisée sera effectué jusqu'à ce que la végétation soit suffisamment résistante pour survivre au cours des périodes de climat sec.

La terre végétale disponible est parfois utilisée, mais, à moins de l'associer à un géotextile, elle est sujette à érosion par l'eau, comme les stériles eux-mêmes. À partir d'un programme établi avec soin, on peut recouvrir, chaque année, la

Fig. 23

Dam of conditioned fly ash

Remblai constitué de cendres volantes «conditionnées»

Bedrock (sandstone/marl)	<i>Fondation rocheuse (grès/marne)</i>
Superficial deposits	<i>Dépôts superficiels</i>
Finger drains	<i>Antennes de drainage</i>
Continuous wall drain	<i>Écran drainant continu</i>
Rock toe	<i>Pied en enrochement</i>
Compacted conditioned PFA	<i>Cendres volantes «conditionnées» compactées</i>
PFA lagoon	<i>Retenue de cendres volantes</i>
Embankment and lagoon raised in 3.3 m lifts	<i>Remblai et retenue s'élevant par levées de 3,3 m</i>
Colliery spoil facing	<i>Parement en déchets de houille</i>

4.8. SLOPE PROTECTION

The exposed downstream slopes of tailings dams can be subject to wind and water erosion. It is usual to protect them in some way, depending on climatic conditions and the type of the tailings. Vegetation, waste rock or geotextiles are commonly used.

4.8.1. Waste rockfill

In cases where the tailings are toxic to vegetation or the climate is too extreme for the growth of vegetation to be successful, the outer slopes may be protected by coarse granular fill such as a waste rockfill, provided it does not contain ore from which heavy metals and acids could be leached out by rainwater, causing pollution. This is best incorporated during construction by forming the slopes with dykes constructed from rockfill or built with a zone of rockfill at their downstream edge as suggested in Section 4.5.2. Because it is difficult to place a layer of rockfill retrospectively over a high, existing, slope of tailings, it is more cost effective to build it during the construction of the dam.

4.8.2. Vegetation

The development of specialist techniques has improved the success of establishing vegetative growth on tailings dams. Various methods can be used to encourage the establishment of a vegetation, including spraying the slope surface with a mulch containing straw, fertilizer and plant seeds. Lime may have to be applied if the deposited materials are acidic. The surface may require temporary stabilisation by covering with a woven geomembrane, pegged down to resist wind forces. It may also require regular watering by light sprays until the vegetation becomes strong enough to survive the natural climatic dry periods.

Topsoil is occasionally used, where available, but unless used in conjunction with a form of geotextile, it will be as susceptible to water erosion as the tailings themselves. By careful timing it may be possible to cover each year, the lift that

couche qui vient d'être mise en place, la végétation poussant lorsque les conditions climatiques sont favorables.

Dans certains cas, des arbustes provenant de pépinières sont plantés sur des claies disposées sur le talus exposé. Cette opération est très lourde, mais peut assurer une protection efficace lorsque les autres types de végétation ne conviennent pas. Des essais de plantation et la détermination préalable des espèces appropriées sont recommandés. Afin de réduire les problèmes de poussière, les retenues de stockage de grande surface peuvent être divisées en deux bassins. L'un sera utilisé pour la mise en dépôt pendant plusieurs années, tandis que l'autre est recouvert de végétation, ce qui diminue la surface exposée. Avant que les différences de hauteur deviennent dangereuses, le déchargement des stériles sera transféré à l'autre bassin.

La toxicité, l'acidité, la faible teneur en substances nutritives et l'absence de micro-organismes dans le sol peuvent s'associer aux conditions inhibitoires de teneur en eau et de température en surface, à la cimentation et à la compacité en surface, pour empêcher que la végétation ne s'établisse sur les dépôts de stériles.

4.8.3. Contrôle des travaux et auscultation

Un ingénieur sera désigné pour surveiller la construction du barrage de stériles et s'assurer qu'il est exécuté suivant les plans et spécifications du projet. Il peut être assisté d'agents chargés de contrôler les travaux quotidiennement et de détecter les difficultés éventuelles. Cet ingénieur recommandera les modifications à apporter au projet s'il constate que la conception initiale n'est plus satisfaisante par suite de changement dans les conditions du site, les caractéristiques des stériles, etc. Il s'agit là d'une méthode de « conception chemin faisant », mais les modifications proposées devront être discutées et acceptées par le concepteur avant mise en œuvre. Un registre sera tenu à jour, consignnant l'avancement des travaux, les résultats des essais courants de densité et de granulométrie, ainsi que toutes modifications de conception.

Des relevés de piézomètres, des mesures de débits de percolation et des lectures d'autres appareils d'auscultation seront effectués et les résultats analysés par l'ingénieur chargé de la surveillance des travaux afin de contrôler l'évolution du comportement du barrage et de la retenue de stockage. Le Bulletin 104 (1996) traite de l'auscultation des barrages de stériles.

4.9. ASSURANCE DE LA QUALITÉ

Afin de s'assurer que les recommandations techniques et environnementales sont bien appliquées, un programme d'assurance de la qualité sera défini pour chaque projet de construction et comprendra la tenue d'un dossier des activités sur le site. Le programme d'assurance de la qualité de construction sera établi parallèlement au Plan de Gestion de l'Environnement portant sur les aspects de contrôle de l'environnement au cours de la construction et de l'exploitation, y compris la conception, la réalisation et l'entretien des points de contrôle de la qualité de l'eau et de l'air, conformément aux conditions d'autorisation d'évacuation.

has just been built and begin vegetation growth while climatic conditions are favourable.

In certain cases, individual shrubs that have been grown in a nursery may be planted on a grid pattern over the exposed slope. This is a labour intensive operation, but can produce a successful protection when other types of vegetation would be found to be unsuitable. The use of planting trials and the early determination of appropriate species is to be encouraged. To reduce dust problems, impoundments with a large surface area may be divided into two basins. One would be used for deposition for several years, while the other is covered with vegetation, thereby reducing the exposed area. Before height differences became dangerous, tailings discharge would be moved to the other basin.

The toxicity, acidity, low nutrient status and absence of soil micro-organisms may combine with inhibitory surface temperature and water regimes, surface cementation and compaction to inhibit the establishment of vegetation on tailings deposits.

4.8.3. Inspection and monitoring

A supervising engineer must be appointed to oversee construction of tailings dams to ensure that they are built according to their designs. He may require the assistance of inspectors to check the work on a daily basis and to detect difficulties that may arise. He may recommend alterations to the design if he sees that the original design has become unsatisfactory due to changes in site conditions, properties of the tailings etc. This is all part of the "design as you go" approach, but proposed variations must be discussed and agreed by the designer before being implemented. A record must be kept of the progress of construction, the results of routine density and particle size tests and any design modifications.

Regular readings of piezometers, seepage flows and other instrumentation must also be recorded and analysed by the supervising engineer to check the on going behaviour of the dams and impoundments. Bulletin 104 (1996) deals with instrumentation and monitoring of tailings dams.

4.9. QUALITY ASSURANCE

In order to ensure the effective application of technical and environmental guidelines, for each construction project a system of quality assurance should be defined, and should include adequate record keeping of site activities. The construction quality assurance plan should be developed in parallel with an Environmental Management Plan which should address environmental monitoring aspects during construction and operation, including the design, construction and maintenance of water and air quality monitoring points in accordance with local discharge consents and licensing conditions.

5. MESURES CORRECTIVES

5.1. INTRODUCTION

Les mesures correctives sont le plus souvent nécessitées par les barrages de stériles n'ayant pas été conçus suivant les principes et pratique indiqués au chapitre 3. Ce chapitre concerne spécialement la stabilité des ouvrages à l'exclusion des problèmes d'environnement associés à leur exploitation normale. Ces problèmes nécessitent des plans d'action spécifiques qui sont discutés ailleurs. En particulier, des problèmes se posent souvent sur les barrages de stériles, de construction très longue ; par suite de modification du procédé de traitement des stériles à l'usine, ces barrages peuvent être surélevés, leur profil en travers modifié ou leur conception initiale changée. Alors que le barrage, tel que conçu à l'origine, aurait eu un comportement satisfaisant, ces modifications conduisent parfois à des problèmes imprévus concernant les dispositifs de drainage ou autres éléments de l'ouvrage.

Certaines circonstances, telles que des précipitations exceptionnelles ou des séismes, nécessitent parfois également des mesures correctives. C'est, en particulier, le cas des barrages de stériles dont les critères hydrologiques et sismiques de projet sont souvent moins sévères que ceux appliqués à d'autres barrages de stockage.

Il faut souligner l'importance d'une surveillance et d'un entretien réguliers, exécutés avec compétence ; cela permettra d'identifier, suffisamment tôt, toutes les mesures correctives et, ainsi, de les étudier et de les mettre en œuvre au moindre coût.

5.2. LES DIVERS PROBLÈMES SUSCEPTIBLES DE SE PRÉSENTER

5.2.1. Introduction

Les chapitres suivants indiquent les divers problèmes pouvant affecter le bon comportement des barrages de stériles. Le chapitre 5.3. examinera les mesures correctives. Le Tableau 1 résume les types et causes des défauts et indique les moyens de leur détection par inspection et auscultation.

5.2.2. Déversement

Un déversement se produit lorsque l'eau surnageant dans la retenue ou les stériles fluides stockés dépassent le niveau de la crête du barrage et s'écoulent sur le talus aval. Suivant le caractère érosif des matériaux du barrage et le volume du

5. REMEDIAL WORKS

5.1. INTRODUCTION

Remedial works are most likely to be required for tailing dams which have not been designed in accordance with the principles and good practice set out in Chapter 3. This chapter relates particularly to structural integrity and does not cover more general environmental problems associated with their normal operation. These problems require specific environmental action plans that are discussed elsewhere. In particular, problems can often develop with tailings dams which are constructed over a long period of time and which, as a result of changes in the method of working of the process from which the tailings are derived, may be heightened or altered in cross section or otherwise changed from that originally intended. Whereas, as originally conceived, the dam may have performed satisfactorily it can happen that changes can lead to unforeseen problems with drainage or other elements of the design.

Remedial works may also be required in circumstances where an event occurs, such as exceptionally heavy rainfall or seismic shock. This is particularly the case for tailings dams, which are often designed to flood and earthquake criteria somewhat less rigorous than those applied to other storage dams.

The importance of regular inspection and routine maintenance competently carried out cannot be over-emphasised, as this should enable the need for any remedial works to be identified at an early stage, thus allowing them to be designed and carried out in a cost effective manner.

5.2. REVIEW OF PROBLEMS WHICH CAN OCCUR

5.2.1. Introduction

The following sections review the principal types of problem which can affect the engineering integrity of tailings dams. Section 5.3 discusses the remedial works necessary to rectify defects. Table 1 summarises the types and causes of defects and indicates the possibility of their detection by inspection and monitoring.

5.2.2. Overtopping

Overtopping occurs when the supernatant water or fluid waste retained by a dam rises above the crest level of the dam and flows down the downstream face. Depending on the erodibility of the material in the dam and the quantity of retai-

Tableau 1 – Types et causes de déficiences - Possibilités de détection d'un risque de rupture, par inspection et/ou auscultation.

Types de déficiences	Causes	Possibilités de détection par inspection et/ou auscultation
Déversement	Mauvaise conception hydrologique ou hydraulique. Perte de revanche résultant d'un tassement de la crête.	Une inspection peut détecter un risque potentiel. Détectable par inspection et mesures topographiques.
Instabilité de talus	Contraintes excessives dans le sol de fondation et le remblai du barrage. Contrôle inadéquat des pressions d'eau.	Des mesures topographiques précises d'alignement et de nivellement, une auscultation par inclinomètre, une inspection peuvent détecter un risque potentiel. Détectable par auscultation piézométrique et contrôle des percolations.
Érosion interne par percolation	Mauvais contrôle des percolations. Mauvaise conception du filtre et du drain. Mauvaise conception ou contrôle insuffisant des travaux, conduisant à une fissuration ou à des chemins de percolation, par exemple, à proximité des conduites.	Détectable par auscultation piézométrique. Difficile à détecter de façon précoce, mais le contrôle du débit de percolation peut indiquer un risque potentiel ; une inspection détectera tôt ou tard le risque, mais parfois trop tard pour permettre de prendre des mesures correctives efficaces. Une très grande vigilance est nécessaire si des percolations augmentent sans rapport avec le niveau de l'eau surmontant.
Érosion externe	Mauvaise protection des talus et du pied.	Détectable par inspection.
Dégâts d'origine sismique	Géométrie inadéquate, par exemple, talus trop raide. Liquéfaction des sables, des matériaux du remblai et des sols de fondation.	C'est un problème de conception. Cependant, une inspection après un séisme non catastrophique peut déceler la nécessité de modifications de conception. C'est un problème de conception. Cependant, des mesures piézométriques pendant et après un séisme non catastrophique peuvent déceler un risque de liquéfaction.
Pollution de la nappe phréatique.	Percolations pénétrant dans la nappe phréatique, du fait de l'absence ou de la détérioration des revêtements.	Détectable par des relevés dans des puits d'observation.
Dégâts survenus aux ouvrages de décantation	Tassements excessifs. Attaque chimique sur le béton/acier.	Détectable par inspection. Détectable par inspection.

Table 1 – Types and causes of defects and possibility of detection of potential failure by inspection and/or monitoring.

Type of defect	Cause	Possibility of detection by inspection and/or monitoring
Overtopping	Inadequate hydrological or hydraulic design. Loss of freeboard due to crest settlement.	Inspection may reveal potential problem. Detectable by survey and inspection.
Slope instability	Overstressing of foundation soil and dam fill. Inadequate control of water pressure.	Precise line and level survey, inclinometer monitoring and inspection may reveal potential problem. May be possible to detect by piezometer and seepage monitoring.
Internal erosion by seepage	Inadequate control of seepage. Bad filter and drain design. Poor design or construction control resulting in cracking or leakage paths e.g. against conduits.	May be possible to detect by piezometer monitoring. Difficult to detect in early stages, but seepage flow monitoring may reveal potential problem; inspection will sooner or later reveal problem, but possibly too late for effective remedial measures to be taken. Extreme alertness required if seepage increases unrelated to supernatant water level.
External erosion	Inadequate slope and toe protection.	Detectable by inspection.
Earthquake damage	Inadequate geometry e.g. slope too steep. Liquefaction of tailings, embankment, foundation soils.	This is a design matter. However, inspection after non-catastrophic earthquake event may indicate need for design modifications. This is a design matter. However, piezometer monitoring during and after a non-catastrophic earthquake event may indicate potential for liquefaction.
Groundwater pollution	Seepage of leachate into aquifers due to lack of or deterioration of liners.	Detectable by monitoring observation wells.
Damage to decant systems.	Excessive settlement. Chemical attack on concrete/steel.	Possibly detectable by inspection. Possibly detectable by inspection.

fluide retenu, ce déversement peut avoir des conséquences désastreuses, avec de grandes quantités de matériaux évacuées à l'aval.

Le déversement peut résulter de l'une - ou plusieurs - des causes suivantes :

1. Critères hydrologiques de projet inappropriés ; par exemple, capacité de retenue insuffisante pour faire face aux apports provenant du bassin versant amont.
2. Mauvaise conception hydraulique ; par exemple, capacité insuffisante de l'ouvrage de décantation ou de l'évacuateur de crue.
3. Perte de revanche causée par un affaissement de la crête du barrage résultant, par exemple, d'un renard et d'une rupture de la crête par suite de l'envahissement de la plage par l'eau de la retenue, du tassement du remblai sous son poids propre, de l'entraînement de matériaux du remblai par érosion interne, du tassement de la fondation, de l'effondrement de cavités dans le terrain sous-jacent résultant de l'extraction de minerais, de l'effondrement de zones de dissolution dans les couches sous le barrage, d'un contrôle insuffisant en exploitation, ou de secousses sismiques.

5.2.3. Instabilité des talus

Le talus aval d'un barrage de stériles peut devenir instable pour l'une - ou plusieurs - des causes suivantes :

1. Contraintes excessives dans le sol de fondation.
2. Contraintes excessives dans les matériaux de construction du barrage.
3. Mauvais contrôle des pressions d'eau ; c'est-à-dire, pressions interstitielles excessives résultant d'un drainage inadéquat ou d'un chargement non drainé, par exemple dû à un séisme.

La manifestation d'un risque d'instabilité dû à une rupture par cisaillement apparaît souvent avant que ne se produisent d'importants mouvements en surface ; une auscultation régulière du barrage (piézomètres, inclinomètres, appareils de mesure des mouvements) sera donc effectuée. Parmi les signes d'instabilité, on peut citer : présence de fissures de traction dans la partie supérieure ou sur la crête du barrage, boursoufflement dans la partie inférieure du talus ou soulèvement du sol près du pied, mouvement de fluage ne ralentissant pas dans le temps. Cependant, il faut noter qu'il y a parfois des situations où aucun signe d'instabilité n'apparaît avant la rupture. Les appareils de mesure peuvent indiquer une accélération de petits mouvements non visibles à l'œil. Les piézomètres peuvent déceler une ligne de saturation s'approchant trop près du talus aval, se traduisant par des pressions interstitielles mettant en danger la stabilité de l'ouvrage.

5.2.4. Érosion interne due aux percolations

Les percolations à travers les matériaux d'un barrage de stériles peuvent provoquer leur érosion interne. Cela risque de se produire lorsque le dispositif de drainage est insuffisant ou lorsque des défauts surviennent à l'intérieur du barrage, par exemple, fissures de tassement ou mauvais compactage du remblai (en particulier, à proximité des conduites). L'érosion des matériaux fins conduit parfois à une rupture rapide et catastrophique du barrage de stériles.

ned fluid this could result in disastrous consequences, with large quantities of material released downstream.

Overtopping may occur for one or more of the following reasons:

1. Inadequate hydrological design; e.g. insufficient lagoon capacity available to cope with flood run off from upstream catchment area.
2. Inadequate hydraulic design; e.g. insufficient capacity of decant system or spillway.
3. Loss of freeboard due to subsidence of dam crest due, for example, to piping and collapse of the crest, caused by pond water invading the beach, to self weight settlement of the embankment fill material, general loss of embankment material due to internal erosion, settlement of the underlying natural ground, the collapse of below ground voids resulting from the extraction of minerals, the collapse of natural solution features in the strata beneath the dam, inadequate control of operation, or seismic shaking.

5.2.3. Slope instability

The downstream slope of a tailings dam can become unstable for one or more of the following reasons:

1. Overstressing of the foundation soils
2. Overstressing of the dam construction materials
3. Inadequate control of water pressures i.e. seepage pressures or excess pore pressures resulting from inadequate drainage or undrained loading e.g. due to an earthquake event.

Evidence of potential instability due to shear failure is often apparent before visible gross surface movements occur and routine monitoring of a dam (piezometers, inclinometers and movement gauges) should therefore be carried out. Signs of instability include the presence of tension cracks in the upper part or in the crest of the dam, bulging of the lower part of the slope or heaving of ground in front of the toe, and creep movements not reducing with time. However, it should be noted that there can be situations where no obvious signs of distress are apparent prior to failure. Movement gauges may show accelerating small movements not visible by eye. Piezometers may show a phreatic surface becoming too close to the downstream slope, indicating pore pressures that may endanger stability.

5.2.4. Internal erosion by seepage

Problems can arise due to internal erosion of material from the tailings dam resulting from seepage of leachate. These can occur when drainage measures provided to control the seepage are inadequate or when defects occur within the dam, for example settlement cracking or poor compaction of fill (particularly against conduits). Erosion of fine material can lead to catastrophic and rapid failure of the tailings dam.

Le risque d'érosion interne à l'intérieur d'un barrage de stériles est difficile à détecter. Il est peu probable que l'auscultation piézométrique décèle le développement d'une situation critique, bien qu'elle fournisse d'utiles informations générales sur l'efficacité du dispositif de drainage. L'observation des débits de percolation à travers le barrage, collectés par les drains, préviendra d'un danger, mais pour être efficace, elle devra être presque continue. Il est très difficile de collecter toutes les percolations, mais la mesure du débit de percolation recueilli par le dispositif de drainage indiquera généralement toute augmentation dangereuse du débit ; une inspection régulière sera également effectuée pour détecter un changement de couleur de l'effluent. Une importante érosion produit des eaux boueuses. Une augmentation, par paliers, du débit de percolation, sans relation avec la montée du niveau d'eau de la retenue ou de fortes pluies, est le signe d'un danger réel. Malheureusement, de nombreux barrages de stériles ne possèdent pas de dispositifs de mesure des fuites et l'on essaiera de recueillir les eaux de percolation dans des canaux, tuyaux et fosses, où le débit et la couleur seront contrôlés.

5.2.5. Érosion externe

L'érosion externe est due à l'action du vent ou de l'eau ; si elle n'est pas maîtrisée, elle peut affecter dangereusement la stabilité des barrages de stériles, soit directement par modification de la géométrie du barrage, soit indirectement par obstruction des drains due aux matériaux érodés. En outre, l'érosion par le vent cause parfois des problèmes d'environnement si les matériaux sont transportés par le vent sur les propriétés voisines.

L'érosion éolienne peut constituer un problème important lorsqu'il existe de vastes surfaces de matériaux granulaires fins exposées au vent, telles que le talus aval d'un barrage de stériles ou la plage de la retenue de stockage.

L'érosion externe par l'eau résulte de diverses causes. Sur le talus aval, elle peut être due à un déversement (voir 5.2.1.) ou à la pluie, et provoquer un ravinement profond dans le cas de matériaux granulaires fins. Elle peut se manifester également lorsqu'un drainage insuffisant à l'intérieur du barrage permet à la ligne de saturation d'atteindre le talus aval et aux percolations de sortir sur ce talus. Cette situation est extrêmement dangereuse (voir paragraphe 3.9.3.) et nécessite des mesures correctives immédiates. Une montée du niveau de la retenue provoquée par une crue, une obturation de l'ouvrage de décantation ou d'autres causes, peuvent conduire à une rupture avant déversement, du fait de l'élévation de la ligne de saturation. Il y a aussi le cas où un barrage de stériles est affecté par une inondation du sol au pied aval du remblai ; le passage du courant de la crue sur le pied peut provoquer un affouillement et entraîner la rupture du talus aval.

En ce qui concerne les barrages de stériles dont la retenue est prévue pour stocker un volume important d'eau ou pour stocker les stériles sous une profondeur d'eau, cette eau est en contact avec le talus amont du barrage ; il importe, dans ce cas, d'assurer une protection de ce talus contre l'action des vagues.

5.2.6. Dégâts d'origine sismique

Les dégâts d'origine sismique consistent généralement en déformations de la crête et du talus aval du barrage, avec dislocation du dispositif de drainage et

The potential for internal erosion within a tailings dam is difficult to detect. Piezometer monitoring is unlikely to indicate the development of a critical condition, although it can provide useful general information on the adequacy or otherwise of drainage systems installed. Observation of seepage flows through the dam into the drainage system will give warning of a potential problem, but to be effective, seepage flows must be monitored almost continuously. It is most difficult to collect all the seepage, but the measured discharge from the drainage system will usually indicate any damaging rise in the rate of flow and regular inspection should also be made to assess discolouration of the effluent. Substantial erosion produces muddy flows. A stepped increase in seepage flow, without causative increase in impoundment water level or heavy rainfall, is a significant danger signal. Unfortunately, most existing tailings dams have no provision for monitoring seepage and attempts should be made to collect seepage into channels, pipes and manholes where colour and flow can be observed.

5.2.5. External erosion

External erosion can occur due to the action of wind or water and if not controlled it can adversely affect the stability of tailings dams either directly, by modification of the geometry of the dam, or indirectly as a result of the eroded material blocking drains. Wind erosion can, in addition, cause environmental problems if wind borne material is carried on to adjacent property.

Wind erosion may be a significant problem where there are large exposed areas of fine grained material such as on the downstream face of a tailings dam or in beach areas of the impoundment.

External erosion by water can happen for several reasons. On the downstream face it can occur as a result of overtopping (see Section 5.2.1.) or due to rainfall, which for fine grained materials can result in deep gullyng. It can also occur in situations where inadequate internal drainage of the dam leads to the phreatic surface reaching the downstream slope and seepage water exiting on the downstream face. This is an extremely dangerous situation, as has been pointed out in Section 3.9.3. and requires immediate remedial action. Rising pool level caused by flood, blocked decant or other causes, can result in failure before overtopping because of the consequential rise of the phreatic surface. Another situation would be where a tailings dam is affected by flooding of the ground at the toe of the embankment. In this case erosion by the passage of floodwater across the toe could lead to undercutting and failure of the downstream face.

On the upstream face of tailings dams retaining the type of impoundment designed to store considerable volumes of water or where the tailings have to be stored under a depth of water, such that the water reservoir is in contact with the upstream slope of the dam, it is important to ensure that the face is protected from the effects of wave action.

5.2.6. Earthquake damage

Earthquake damage commonly consists of deformations of the crest and downstream slope with associated disruption of drainage and other elements of the

d'autres éléments de l'ouvrage. Dans les cas extrêmes, le séisme peut provoquer la rupture totale du barrage de stériles (par exemple, s'il y a liquéfaction des stériles, des matériaux du remblai ou de la fondation). Mais même s'il n'y a pas de rupture grave au moment du séisme, il importe de réparer rapidement tous les dégâts subis par le barrage, par exemple, affaissement de la crête conduisant à une submersion de la plage ou à un déversement. Une inspection détaillée de l'ensemble de l'ouvrage sera effectuée après chaque séisme.

5.2.7. Dégâts causés aux ouvrages de décantation

Les conduites de décantation passant sous le remblai peuvent être sérieusement endommagées par suite de tassements excessifs de la fondation ; la rupture de la conduite provoque alors une inondation avec déversement, ou une érosion interne des matériaux avec entraînement dans la conduite à travers une cassure, toutes deux conduisant à une rupture du remblai. Il est donc essentiel de vérifier que la conception de l'ouvrage de décantation est satisfaisante compte tenu des conditions de fondation et de la hauteur maximale prévue pour la retenue de stockage. Si une hauteur plus grande est envisagée, on examinera si l'ouvrage de décantation est approprié. Lorsqu'un ruisseau passe à travers la retenue et est évacué par l'ouvrage de décantation, celui-ci doit être capable d'évacuer la crue maximale déterminée en tenant compte de la dimension et de la nature du bassin versant, ainsi que de la présence de communautés et d'habitations près de la retenue. Les ouvrages de décantation peuvent également être endommagés par attaque chimique (lessivage des matériaux ayant servi à leur construction).

Lorsqu'un barrage comportant une conduite sur sa base et ayant atteint sa hauteur de projet doit être notablement surélevé, on installera un nouvel ouvrage de décantation à un niveau plus élevé.

5.2.8. Pollution de la nappe phréatique

Au cours du projet, une grande attention est maintenant portée à l'élimination des risques de pollution de la nappe phréatique sous et à proximité des sites de dépôt de stériles. Toutefois, de nombreux anciens aménagements ont été exécutés à une époque où l'on se préoccupait moins de la protection de l'environnement et où la législation concernant l'environnement était moins rigoureuse que maintenant. Des problèmes de pollution de la nappe phréatique sont donc apparus et continueront à se présenter. Même pour les ouvrages où le souci de la protection de l'environnement n'était pas absent lors de la conception, des problèmes de pollution de la nappe souterraine peuvent survenir, résultant, par exemple, de la détérioration des revêtements synthétiques, de l'inadaptation des revêtements en argile au fur et à mesure que les travaux avancent et que le niveau de la retenue de stockage augmente, ou de l'altération chimique des stériles.

Le contrôle de la qualité d'échantillons d'eau souterraine, prélevés dans des puits d'observation situés à l'aval de la retenue de stockage, permet de détecter une pollution éventuelle de la nappe phréatique.

design. In the extreme, earthquakes can cause total failure of a tailings dam, (for example if liquefaction of the tailings, embankment or foundation soils occurs). However, even if a serious failure does not occur at the time of the event, it is important to take action quickly to repair any damage sustained by the dam e.g. crest subsidence that could result in immersion of the beach or overtopping. The whole structure should be inspected and investigated following any earthquake event.

5.2.7. Damage to decant systems

Decant conduits passing under the embankment can be severely damaged by excessive foundation settlement, and collapse of the conduit can result in flooding causing overtopping or internal erosion of material into a break in the culvert, both resulting in embankment failure. It is important, therefore, to ensure that the design of the decant system is satisfactory related to the ground conditions and the maximum height of the impoundment to be achieved. If at any stage a greater height is contemplated the adequacy of the decant system should be reviewed. In cases where a stream passes into the water pond and out through the decant system, it must be capable of discharging the maximum appropriate flood consistent with the size and nature of the catchment and the relation of the impoundment to nearby dwellings and communities. Decant systems can also be damaged due to chemical attack by the leachate on the materials from which they are constructed.

When a dam with a culvert passing under it, that has reached the design height, is to be raised considerably, consideration should be given to providing a new decant system at a higher level.

5.2.8. Groundwater pollution

The need to prevent pollution of the groundwater below and adjacent to tailings disposal sites is generally now an important design consideration. However, many older schemes were started at a time when there was less concern or appreciation of the need to protect the environment and when legislation was less stringent in this respect than it is now. As a result, problems with groundwater pollution have arisen and will continue to do so. Even for schemes designed with environmental protection in mind, problems with groundwater pollution can occur, for example due to the deterioration of synthetic liners or the inadequacy of clay liners as the scheme develops and impoundment levels increase, or chemical deterioration of the tailings themselves.

Groundwater pollution can be detected by monitoring the quality of groundwater samples obtained from observation wells located downstream of the impoundment.

5.3. MESURES CORRECTIVES

5.3.1. Introduction

Les mesures faisant l'objet des chapitres suivants sont correctives plutôt que préventives. Pour les nouveaux aménagements, on veillera à ce que les problèmes ne se présentent pas, en concevant les ouvrages suivant les principes et pratique indiqués dans le présent Bulletin. Pour les aménagements anciens, on s'appuiera sur l'inspection et l'auscultation pour détecter les problèmes potentiels et éviter qu'ils ne se posent. Des recommandations sur l'inspection et l'auscultation sont données dans le Bulletin 104 publié en 1996.

5.3.2. Déversement - mesures correctives

Sous réserve que le déversement n'entraîne pas une rupture catastrophique du barrage, les mesures correctives consistent essentiellement à remplacer les matériaux perdus par érosion sur la crête et sur le talus aval, et à réparer les ouvrages annexes endommagés. Lors de la réparation, on doit veiller à choisir des matériaux de remblai ayant des propriétés convenables (résistance, densité, perméabilité et pérennité) et pouvant être mis en place et bien compactés par les engins mobiles sur le chantier de réparation. Si nécessaire, on fera appel à des mesures spéciales, telles que gabions, géogrilles ou géotextiles, pour assurer une résistance vis-à-vis de tout déversement ultérieur. La réparation des dégâts par érosion est examinée au chapitre 5.3.5.

Il est essentiel de déterminer la cause du déversement et d'entreprendre, en plus de la réparation du barrage, des travaux en vue de prévenir tout retour possible d'un tel incident. Ces travaux peuvent comprendre l'une ou plusieurs des mesures suivantes : modification de la méthode d'exploitation de l'aménagement afin qu'une revanche supplémentaire soit disponible pour s'adapter à des montées exceptionnelles du niveau de la retenue de stockage ; surélévation du niveau de la crête pour parvenir à la même situation ; surélévation de la crête pour faire face à un affaissement ultérieur ; ou augmentation de la capacité de l'ouvrage de décanation ou de l'évacuateur de crue.

5.3.3. Instabilité des talus - mesures correctives

Avant la mise en œuvre des mesures correctives définitives, il est nécessaire de déterminer les causes de l'instabilité. A moins que la cause ne soit évidente, une enquête et une étude seront effectuées pour rechercher la cause et, le cas échéant, fournir des informations pour la mise au point des travaux de réparation. Cependant, il y a des cas où, après une rupture, il importe d'entreprendre d'urgence des travaux afin de sauvegarder l'ouvrage vis-à-vis de dégâts catastrophiques ultérieurs possibles ; dans de tels cas, le temps manque pour mener une enquête détaillée avant le démarrage des travaux de réparation.

Ces mesures correctives, qu'elles soient des réparations définitives ou des mesures d'urgence, comprennent les techniques suivantes :

5.3. REMEDIAL WORKS

5.3.1 Introduction

The remedial works discussed in the following sections are corrective rather than preventative measures. For new schemes problems should be prevented from arising provided that the schemes are designed in accordance with the principles and good practice given in this Bulletin. For old schemes much reliance may necessarily have to be placed on inspection and monitoring in order to identify potential problems and prevent them occurring. Guidelines on inspection and monitoring are given in Bulletin 104 on instrumentation and monitoring, published in 1996.

5.3.2. Overtopping - remedial works

Provided that overtopping has not resulted in a catastrophic failure of the dam the remedial works would consist essentially of replacing material lost from the crest and downstream slope as a result of erosion, and repairing any ancillary works damaged by the event. Care must be taken when making the repair to select fill material having suitable properties e.g. strength, density, permeability and durability, and which is capable of being placed and adequately compacted by the plant that can be mobilized to the site of the repair. If necessary, consideration may have to be given to the use of special measures such as gabions, geogrids or geotextiles to provide the necessary resistance to any future overtopping. The repair of erosion features is discussed in Section 5.3.5.

It is essential to determine the cause of the overtopping and to undertake works to prevent any possible recurrence, in addition to repairing the dam. Such works could include one or more of the following measures: modifying the method of operating the scheme so that additional freeboard is available to accommodate exceptional rises in impoundment level; raising the crest level to achieve the same situation; raising the crest to allow for future subsidence, or providing greater capacity of the decant system or spillway.

5.3.3. Slope instability - remedial works

Before constructing permanent remedial measures it is necessary to determine the causes of the instability. Unless the cause is obvious, sufficient investigation should be carried out to determine the cause and if appropriate and necessary, to provide information for the design of the remedial works. However, there may be circumstances when, following a failure, it is necessary to carry out some work as a matter of urgency in order to safeguard the scheme from further and possibly catastrophic damage, in which case there may not be time to carry out detailed investigations in advance of starting the remedial work.

Whether for permanent repair or as an emergency measure, remedial works for slope stabilisation would normally include one or more of the following techniques:

- modification du profil du barrage ;
- installation de dispositifs de drainage pour abaisser le niveau de la ligne de saturation : tranchées drainantes profondes sur le talus aval, drains forés horizontalement, pied drainant supplémentaire, etc., tous ces dispositifs étant protégés efficacement par des filtres bien conçus pour éviter l'entraînement de matériaux ;
- consolidation des sols ;
- construction d'ouvrages de soutènement, tels que recharges de pied au moyen d'encrochement.

Le Tableau 2 indique les principales mesures correctives pouvant intervenir pour résoudre des problèmes de rupture susceptible de se manifester en profondeur et des problèmes d'instabilité peu profonde.

Il importe de tenir compte des effets déstabilisateurs éventuels pouvant résulter des travaux de réparation. Par exemple, les charges statiques et dynamiques exercées par les engins peuvent avoir un effet néfaste sur la stabilité ; l'installation de dispositifs de drainage ou de murs de soutènement, nécessitant des fouilles en pied de talus instables, sera réalisée sur de courtes longueurs. Si l'on juge nécessaire d'installer des drains forés, il faudra s'assurer que les débits dans le forage n'entraînent pas une rupture par renard au cours des travaux.

Tableau 2 – Mesures correctives possibles pour résoudre des problèmes d'instabilité de talus.

Types d'instabilité de talus	Mesures correctives possibles
Rupture possible en profondeur	<ul style="list-style-type: none"> • Modification du profil du barrage ; par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - adoucissement de la pente du talus aval - construction d'une risberme au pied - réduction de la hauteur de la crête • Installation d'un drainage profond ; par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - drains forés sub-horizontaux - puits de décompression au pied - pointes filtrantes • Construction d'ouvrages de soutènement ; par exemple, murs de pied ancrés
Instabilité peu profonde	<ul style="list-style-type: none"> • Abaissement de la ligne de saturation • Adoucissement du talus • Construction de tranchées drainantes sur le talus • Consolidation du sol ; par exemple, armature, injection, contreforts • Enlèvement et remplacement des matériaux de faible résistance ou disloqués • Mise en place d'une couverture de végétation

- modification of the dam profile
- installation of drainage works to lower the level of the phreatic surface, such as deep trench drains on the downstream slope, horizontally bored drains, additional toe drainage, etc., all carefully protected by well designed filters to prevent loss of fill.
- installation of soil reinforcement
- construction of retaining structures, such as toe weighting with rockfill.

Table 2 indicates the principal types of remedial measures that could be considered for dealing with potential deep seated failure and shallow instability.

It is important that consideration be given to any potentially destabilising effects resulting from the construction of remedial works. For example the static or dynamic loads associated with construction plant could have an adverse effect on stability, and drainage or retaining wall installation works requiring excavation downslope of unstable or potentially unstable slopes should be undertaken in short lengths. If it is considered necessary to install bored drains great care would be required to ensure that seepage into the bore does not instigate a piping failure during installation.

Table 2 – Possible remedial measures for slope instability problems.

Types of Slope Instability	Possible Remedial Measures
Potential Deep Seated Failure	<ul style="list-style-type: none"> • Modify dam profile e.g. <ul style="list-style-type: none"> - flatten downstream slope - add toe berm - reduce crest height • Install deep drainage e.g. <ul style="list-style-type: none"> - sub horizontal bored drains - pressure relief wells at toe - well points • Construct retaining structure e.g. anchored toe walls
Shallow Instability	<ul style="list-style-type: none"> • Lower phreatic surface • Flatten slope • Construct trench drains on slope • Reinforce and/or strengthen the soil e.g. nailing, grouting, counterforts • Remove and replace weak or disturbed material • Plant appropriate vegetation

5.3.4. Érosion interne due aux percolations - mesures correctives

L'érosion due à des défauts à l'intérieur du barrage, tels que drainage insuffisant pour maîtriser les percolations, fissures, mauvaise installation des conduites traversant le barrage, ou mauvaise protection des drains par les filtres, sera probablement difficile à détecter, et le développement d'une rupture par renard sera souvent trop rapide pour permettre la mise en œuvre de mesures correctives. Cependant, lorsque celle-ci est possible, le type de mesure dépendra du défaut à réparer. Dans tous les cas, la première mesure consistera, en urgence, à réduire le niveau de l'eau ou des boues de stériles dans la retenue de stockage. En outre, si l'origine des percolations causant l'érosion peut être localisée sur le talus amont, des matériaux seront mis en place pour colmater. Toutefois, cela sera rarement possible du fait que la zone de pénétration de ces infiltrations sera habituellement cachée par les stériles mis en dépôt. Une autre mesure d'urgence pour empêcher une rupture sérieuse ou catastrophique consistera à mettre en place rapidement des matériaux drainants sur le talus aval pour constituer un filtre inversé destiné à maîtriser le gradient de sortie des percolations et à réduire le risque d'érosion régressive.

Après les mesures d'urgence, on veillera à réparer, de manière définitive, les défauts causant l'érosion interne. Que ceux-ci soient dus à des erreurs de conception ou à une détérioration dans le temps des dispositifs de drainage existants, les mesures correctives peuvent comprendre : l'inspection, le nettoyage ou la réparation des drains existants, ou bien la mise en œuvre de l'une - ou plusieurs - des mesures de drainage suivantes. Bien entendu, il ne faut pas oublier d'y associer une protection par un filtre parfaitement conçu et destiné à prévenir l'érosion interne :

- Tranchées drainantes profondes dans le talus aval du barrage
- Drains forés sub-horizontaux (voir chapitre 5.3.3. concernant l'installation)

- Drain de pied
- Tapis drainant et recharge sur le talus aval
- Puits de décompression
- Pointes filtrantes.

Comme variante, ou mesure complémentaire, on peut envisager la mise en place d'une risberme de pied drainante ou drainée à la base, ou bien la réalisation d'une tranchée à la boue, ou d'une paroi moulée dans le corps du barrage.

5.3.5. Érosion externe - mesures correctives

On peut faire face à l'érosion externe due à l'action du vent et de la pluie en recouvrant la surface exposée par des matériaux grossiers, non érodables, ou en effectuant une stabilisation par produits chimiques, ou en utilisant de la végétation. La mise en place d'un tapis de matériaux relativement grossiers est une solution avantageuse si l'on dispose localement de matériaux appropriés, de coût peu élevé. La stabilisation par produits chimiques a été utilisée comme mesure provisoire, mais elle peut être coûteuse et ne pas constituer une solution définitive. La

5.3.4. Internal erosion by seepage - remedial works

Erosion resulting from defects within the dam such as inadequate drainage to control seepage, cracking, poor detailing of conduits through the dam or poor filter protection of drains, is likely to be difficult to detect and the development of a piping failure may often be too rapid to allow remedial measures to be implemented. However, in circumstances where remedial work is possible, the type of measure to be adopted will depend on the defect to be rectified. In all cases the first action should be, as a matter of urgency, to reduce the level of the water or slurry retained in the impoundment. Furthermore, if the source of the seepage causing the erosion can be located on the upstream face, material should be placed to effect a seal. However, it will rarely be possible to do this as the area of seepage flow entry will normally be obscured by the impounded tailings. Other emergency remedial works necessary to try to prevent a major or catastrophic failure would be the rapid placement of drainage material on the downstream face to act as an inverted filter and thereby control the exit gradient of the seepage and reduce the risk of headward erosion.

Following the implementation of emergency measures attention should be directed to the permanent rectification of the defects causing the internal erosion. Whether these are due to design shortcomings or because of the deterioration of existing drainage measures with time, appropriate remedial measures may consist of inspection, cleaning or repair of existing drains or the installation of one or more of the following drainage measures. Each must be fully protected by a correctly designed filter system to prevent internal erosion:

- deep trench drains in the downstream slope of the dam
- sub horizontal bored drains (see comments in Section 5.3.3 concerning installation)
 - toe drain
 - blanket drain and weighting on downstream face
 - pressure relief wells
 - well points

As an alternative, or in addition, consideration could be given to the placement of a free draining or suitably underdrained toe berm, or the installation of a slurry trench or diaphragm wall in the body of the dam.

5.3.5. External erosion - remedial works

External erosion due to wind action and the effects of rainfall can be prevented either by covering the exposed surface with a coarser, non erodible material, or by chemical stabilisation or by the use of vegetation. The placement of a blanket of relatively coarse material may be a favoured option if there is an inexpensive supply of suitable material locally available. Chemical stabilisation has been used for temporary tailings erosion control but may be relatively expensive and may provide a less permanent solution. The planting of vegetation is, in many

plantation de végétation est souvent la meilleure solution, mais elle demande un certain temps avant de devenir efficace et nécessite la fourniture de terre végétale, d'engrais, etc., et des moyens d'irrigation. On peut utiliser des géotextiles biodégradables pour maîtriser l'érosion, jusqu'à ce que la végétation ait suffisamment poussé.

Des risbermes réalisées sur les talus aval des barrages de stériles sont utiles pour combattre l'érosion par ruissellement. Leur espacement vertical ne dépassera pas 10 m et leur largeur sera suffisante pour permettre l'accès du matériel d'entretien. Les risbermes seront pentées et seront équipées, si nécessaire, de caniveaux destinés à recueillir et à évacuer les eaux de ruissellement.

En ce qui concerne les remblais dont le pied est érodé du fait d'inondation provenant de cours d'eau voisins, les réparations consisteront à remplacer les matériaux érodés et à protéger le talus contre des dégâts ultérieurs, par exemple au moyen de riprap.

L'érosion du talus amont, due à l'action des vagues sur un barrage dont la retenue est conçue pour stocker de l'eau au-dessus des stériles, peut être évitée en protégeant le talus au moyen de riprap. Malheureusement, cette protection est perdue au fur et à mesure que le barrage augmente de hauteur, et il est préférable d'utiliser des géomembranes fixées par des piquets sur la zone concernée du talus. Lorsqu'un stockage d'eau n'est pas prévu dans la retenue, on ne laissera pas l'eau de surverse empiéter sur la plage, ce qui provoquerait des infiltrations dans le remblai de sable du barrage ; dans ce cas, il n'y a pas de problème d'érosion par les vagues. Cependant, si des mesures correctives sont nécessaires par suite d'imperfections dans la conception, l'érosion peut être arrêtée en mettant en place des matériaux de granulométrie appropriée. Ici encore, l'utilisation d'un géotextile est à recommander. Le risque d'érosion est réduit en construisant une risberme juste au-dessous du niveau de l'eau stagnante afin de dissiper l'énergie des vagues. La plantation de végétation résistant à l'immersion peut également être utile.

5.3.6. Dégâts d'origine sismique - mesures correctives

Les dégâts caractéristiques subis par des barrages de stériles lors de séismes consistent en tassements et déplacements latéraux, associés à des fissurations, en particulier dans la direction longitudinale, c'est-à-dire parallèle à la crête. Des dispositifs de drainage et des ouvrages peuvent également être affectés. Les mesures correctives dépendront du type et de l'importance des dégâts subis et une inspection détaillée sera effectuée. En outre, il sera souhaitable de réexaminer l'ensemble du projet de l'ouvrage et d'exécuter les travaux permettant d'être assuré d'un comportement satisfaisant pendant et après de futurs séismes.

5.3.7. Dégâts causés aux ouvrages de décantation - mesures correctives

Les mesures correctives à appliquer aux ouvrages de décantation endommagés dépendront de la conception du dispositif, de la cause et de la nature des dégâts, ainsi que de leur importance. S'il y a rupture de la conduite de décantation, on prendra des mesures d'urgence : mise en service d'un pompage ou création d'un évacuateur provisoire. Les travaux de réparation définitifs feront l'objet d'un projet détaillé.

cases, the best option, but has the disadvantage that it takes time to become established, and it may necessitate the importation and placement of topsoil, fertilizers etc. and the use of irrigation measures. Biodegradable geotextile fabrics can be used to control erosion whilst vegetation growth is established.

The construction of berms on the downslope faces of tailings dams are useful for controlling seepage erosion. They should typically be at vertical height spacing of not greater than 10 m and should be wide enough to allow access for maintenance plant. The berms should be laid to falls and berm drains constructed if necessary to collect and channel surface water.

For embankments affected by toe erosion as a result of flooding of adjoining water courses, remedial works would consist of replacing the eroded material and protecting the slope from further damage for example by the use of rip rap.

Erosion of the upstream slope due to wave action on dams retaining impoundments designed to store water above the tailings can be avoided by protecting the slope with rip-rap. Unfortunately this becomes lost as dam height increases and a cheaper solution may be to use geomembranes pegged down on to the affected part of the slope. With an impoundment not intended to store water, the supernatant pond should never be allowed to rise sufficiently to encroach the beach because of the leakage this would allow into the sand body of the dam, so there should never be a problem of wave erosion. However, if such circumstances prevail and remedial works are necessary because of design inadequacies, erosion can be arrested by the placement of suitably sized granular material. Again, in some circumstances the use of a geotextile may be appropriate. The potential for erosion can be reduced by the construction of a berm just below the standing water level in order to dissipate wave energy. Planting of immersion resistant vegetation may also be helpful.

5.3.6. Earthquake damage - remedial works

Typical earthquake damage of tailings dams consists of settlement and lateral displacement with associated cracking particularly in the longitudinal direction i.e. parallel to the crest. Drainage measures and structural works may also be affected. The remedial measures required for damage caused by earthquake will depend on the type and extent of damage sustained and a detailed inspection should be carried out. Furthermore, it may be appropriate to review the overall design of the scheme and to carry out works to ensure that it will operate satisfactorily during and after any future earthquake events.

5.3.7. Damage to decant systems - remedial works

Remedial works to damaged decant systems will depend on the design of the system, the cause and nature of the damage and the extent of the damage. In the event of a collapse of the decant conduit, emergency measures may include operating a pumping system or creating a temporary spillway. Permanent remedial works would have to be the subject of detailed engineering design.

5.3.8. Pollution de la nappe phréatique - mesures correctives

Une nouvelle législation ou une pollution effective de la nappe phréatique nécessite des mesures spéciales de maîtrise de la pollution ; préalablement à l'étude de telles mesures, il importe de connaître parfaitement l'hydrogéologie du site. Cela implique l'installation et le relevé de piézomètres pour déterminer les directions de l'écoulement, les gradients hydrauliques et les caractéristiques de la nappe souterraine. A partir de ces données, des décisions pourront être prises au sujet de la faisabilité et du coût des mesures de maîtrise des percolations.

On peut distinguer deux types de mesures de maîtrise : les dispositifs de coupure des percolations et les dispositifs de collecte (retour). Le premier type comprend : les murs parafoilles, les tranchées à la boue et les rideaux d'injection. Lors de l'étude de ces mesures, il importe de tenir compte, non seulement de leur efficacité à maîtriser la pollution de la nappe souterraine, mais aussi des effets nuisibles qu'elles peuvent avoir sur la stabilité du fait des pressions d'eau sous le barrage de stériles.

Dans certains cas, il est préférable d'installer, au lieu d'ouvrages de coupure, des dispositifs de collecte des eaux de percolations. Ceux-ci ne coupent pas les percolations - comme les premiers - mais permettent de recueillir l'eau polluée pour traitement ou de s'en débarrasser de manière à ne pas porter atteinte à l'environnement. Ce dispositif comprend des fossés ou des puits de collecte.

Les avantages et les limitations des mesures de maîtrise des percolations sont indiqués dans le Tableau 3 (d'après Vick, 1983).

Tableau 3 – Sommaire des mesures de maîtrise des percolations, destinées à éviter ou réduire la pollution de la nappe phréatique

Mesures de maîtrise des percolations	Types	Avantages	Limitations
Ouvrages de coupure des percolations	Mur parafoille	Faible coût - Bon contrôle des installations	Ne convient pas aux fondations saturées ; efficace seulement pour les couches perméables de faible profondeur
	Écran (tranchée à la boue)	Coupure de faible perméabilité, pouvant être réalisée	Coût élevé ; ne convient pas aux terrains de pente raide ni aux sols contenant des blocs ; limite inférieure d'étanchéité requise
	Rideau d'injection	Peut atteindre de grandes profondeurs ; n'est pas affecté par la topographie du site	Coût élevé ; efficacité limitée du fait de la perméabilité de la zone injectée ; injection de ciment convenant seulement aux sols grossiers ou aux larges diaclases de roche
Dispositifs de collecte	Tranchée	Faible coût ; convient à tout type de remblai	N'est totalement efficace que pour des couches perméables peu profondes, mais convient encore à d'autres cas
	Puits	Profondeur non limitée ; utile comme mesure corrective	Coûteux ; l'efficacité dépend des caractéristiques de la nappe souterraine locale

5.3.8. Groundwater pollution - remedial works

If, either because of new legislation or because groundwater pollution is occurring, it is necessary to undertake special measures of pollution control, a prerequisite to the design of such measures is a thorough understanding of the hydrogeology of the site. This would normally involve the installation and monitoring of piezometers to determine directions of flow, hydraulic gradients and aquifer characteristics. On consideration of such data decisions can be made as to the feasibility and cost effectiveness of seepage control measures.

Two types of control measure could be considered namely seepage barriers and return systems. Seepage barriers serve to prevent seepage and would include cut-off trenches, slurry walls and grout curtains. It is important when deciding whether to implement such measures to consider not only whether they would achieve the required effect in controlling groundwater pollution but also any adverse affect such installations may have on stability with regard to water pressures below the tailings dam.

In some cases it may be more appropriate to install return systems instead of seepage barriers. Unlike seepage barriers return systems collect, rather than impede, seepage flows, thereby enabling polluted water to be retained for treatment or disposed of in a manner which will not damage the environment. The return system could consist of collector ditches or wells.

The advantages and limitations of seepage control measures are given in Table 3 (after Vick, 1983).

Table 3 – Summary of seepage control measures to prevent or mitigate groundwater pollution.

Seepage Control Measures	Type	Advantages	Limitations
Seepage	Cutoff trench	Inexpensive; installations can be well controlled	Not practical for saturated barriers foundations; effective only for shallow pervious layers
	Slurry walls	Low-permeability barrier can be constructed	High cost; not well suited for steep terrain or bouldery ground; impervious lower boundary required.
	Grout curtains	Barrier can be constructed to great depths; not affected by site topography	High cost; limited effectiveness due to permeability of grouted zone; cement grouting practical for only coarse soils or wide rock joints
Return systems	Collector ditches	Inexpensive; suitable for any type of embankment	Completely effective for only shallow pervious layers, but still beneficial in other cases
	Collector wells	Unlimited depth; useful as a remedial measure	Expensive; effectiveness depends on local aquifer characteristics

Une autre solution, applicable dans certains cas, consiste à effectuer un pré-traitement des stériles avant leur mise en dépôt, afin d'éviter ou de réduire la pollution de la nappe phréatique par les eaux de lessivage ultérieures.

An alternative solution which may be possible in some instances is to carry out some form of pre-treatment of the tailings prior to disposal in order to prevent or minimise any contamination of the groundwater by subsequent seepage of leachate.

6. RÉHABILITATION ET FERMETURE

6.1. INTRODUCTION

Une retenue de stockage de stériles aura généralement une longue existence après la cessation des activités de la mine ou de l'usine de traitement des minerais associée. Un dépôt de stériles n'apporte aucun profit à la compagnie minière ; une retenue de stockage de stériles est généralement conçue en recherchant le rendement maximal et le coût minimal et, par conséquent, on a la tentation de considérer la phase « long terme » de l'ouvrage comme étant d'importance secondaire dans la conception des installations minières. Il est pourtant fondamental que le remblai, les résidus stockés et les ouvrages annexes continuent à ne présenter aucun danger au cours de leur existence ; il est donc primordial que le maître d'œuvre prenne en considération les conditions de long terme dès le début de la conception de l'aménagement de stockage des stériles.

Il est de plus en plus courant que les autorités de contrôle demandent une étude concernant la phase « long terme » (ou post-exploitation), cette étude faisant partie du dossier « Environnement » du projet préliminaire soumis aux autorités. Cette étude peut porter sur les questions suivantes :

- a) aspects techniques et surveillance à long terme de l'aménagement en vue d'assurer sa stabilité et sa sécurité ;
- b) contrôle des effets sur l'environnement afin d'éviter la contamination de la nappe phréatique par les eaux de percolation provenant des stériles stockés, la pollution de l'air par les poussières, ou des émissions dangereuses ;
- c) programme de réhabilitation à mettre en œuvre à la fin de la période d'exploitation, ou faisant partie d'un programme de restauration continue.

Il est courant également que les autorités demandent de constituer une caution financière chez un tiers, afin de pouvoir financer les travaux de restauration d'un aménagement non achevé par suite d'une cessation d'activités de la compagnie minière.

Le présent chapitre aborde ces questions qui seront examinées, au début de l'étude, à une époque où la retenue de stockage des stériles sera pleine et effectivement abandonnée ; il considère également les mesures devant être prises au cours et à la fin des opérations de stockage pour atténuer la dégradation du site à long terme et améliorer la réhabilitation en vue d'une meilleure intégration dans le paysage.

6. REHABILITATION AND CLOSURE

6.1. INTRODUCTION

A tailings impoundment will generally remain in existence long after the associated mine or minerals processing plant has ceased to function. Tailings disposal produces no profit for a mining company; an impoundment usually has to be designed as effectively and as economically as possible and, in consequence, there is a temptation to consider the long term condition of the structure to be of secondary importance in the initial mine planning process. It is however of fundamental importance that the embankment, stored residues, and ancillary structures remain safe for as long as they exist and it is therefore of the utmost importance that long term considerations are taken into account by the Engineer at an early stage in the design of the disposal scheme.

It is becoming increasingly common for licensing or Regulatory Agencies to require a long term or after use plan to be prepared as part of the Environmental Statement accompanying the initial Planning Submission; this may consider for example:

- a) the engineering aspects and long term surveillance of the scheme in order to address long term stability and safety;
- b) environmental controls to avoid groundwater contamination from seepage arising from stored residues, or air pollution from dust, or hazardous emissions; and
- c) some form of rehabilitation plan to take place on completion of the scheme or as part of an ongoing restoration programme.

It is also not uncommon for Agencies to require some form of financial bond to be lodged with a third party in order to fund restoration of a partially completed scheme in the event of cessation of trading or operation of the mining company.

This chapter addresses those factors which should be considered, at the outset of design, at a time when the impoundment will be complete and effectively abandoned, together with measures that can be taken during, and at the end of, the scheme to mitigate long term degradation of the site and to enhance the rehabilitation of the structure affording better integration into the surrounding landscape.

6.2. CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

L'abandon de l'aménagement et sa réhabilitation qui suit représentent indiscutablement un coût élevé pour le propriétaire ou l'exploitant ; mais, il est également vrai qu'il est, en général, plus coûteux de faire des travaux sur une retenue de stockage ultérieurement que de programmer les opérations de fermeture dès le début de la production. De même que le coût de mise en dépôt peut être réduit en concevant une construction s'adaptant à la production minière, de même un programme de fermeture bien conçu, comprenant une restauration progressive, peut conduire au coût minimal à supporter lorsque la mise en dépôt des stériles prend fin.

En outre, l'identification minutieuse et l'évaluation continue des opérations de fermeture et de réhabilitation permettent d'estimer les coûts de production ; des opérations mal conçues et mal contrôlées peuvent entraîner des dépenses élevées à un moment où la production diminue. En l'absence de revenus permettant de faire face au coût des mesures d'abandon, celles-ci seront probablement moins efficaces, ce qui conduira à des opérations très lourdes de surveillance et d'entretien dans les années futures.

Historiquement, la tendance a été d'établir des programmes de dépenses basés sur de faibles coûts au début et en cours d'exploitation, mais donnant lieu à des dépenses élevées pour les opérations d'abandon et de réhabilitation. Les exigences de plus en plus fortes des autorités de contrôle et la réglementation relative à l'environnement ont conduit à des aménagements dans lesquels les mesures de fermeture et de réhabilitation sont évaluées et mises en œuvre progressivement pendant toute la vie de la retenue de stockage, le programme des dépenses étant ainsi plus régulier.

La nature et l'importance des mesures dépendront du mode d'exploitation de la mine et des règlements en vigueur, de facteurs locaux tels que le climat et la structure du sol, ainsi que de la politique financière de la compagnie minière. De toute façon, il faut étudier et programmer les mesures d'abandon et de réhabilitation et en tenir compte dans le projet initial de l'aménagement.

L'étude d'une installation minière qui, dès le début, prend en considération le coût total de la mise en dépôt des stériles et le coût des opérations d'abandon, fera apparaître des domaines où d'autres techniques de construction ou d'exploitation peuvent diminuer le coût global. Comme exemples, on peut indiquer : la dérivation, dès le début, des cours d'eau permettant de réduire le coût de mise en place et le contrôle à long terme des effets sur l'environnement ; ou le stockage d'une réserve de matériaux de couverture provenant du décapage du site, qui réduira l'apport de matériaux lors de la fermeture.

Divers projets de mise en dépôt seront examinés, sous un angle critique, afin d'aboutir, si possible, à une solution mettant en corrélation les trois domaines : technique, environnement et restauration, et donnant le coût minimal de l'opération de fermeture lorsque la production cesse.

6.2. ECONOMIC CONSIDERATIONS

Although the process of abandonment and subsequent rehabilitation indisputably represents a heavy cost to the owner or operator, it is also generally true that it costs more to build or modify an impoundment at a later date than to plan for closure at the outset of production. Just as disposal costs can be minimised by an effective design that tailors construction to output, a well planned closure scheme which introduces progressive restoration can lead to minimal costs being incurred when tailings disposal ceases.

Furthermore, carefully identified and continuously costed closure and rehabilitation measures can be used to assess the product costs; uncontrolled and unplanned measures can lead to high expenditure at a time when production is declining. Without the income against which to meet abandonment costs, closure schemes are likely to be less than effective, resulting in heavy maintenance and surveillance in future years.

Historically, the trend has been towards expenditure profiles based on low initial and operating costs resulting in high abandonment and rehabilitation expenditure. Increasing pressure from regulatory authorities and thorough environmental directives is having the effect of producing schemes in which closure and rehabilitation measures are costed and implemented progressively throughout the life of the impoundment, leading to a more even expenditure profile.

Clearly, the form and extent of measures will depend upon the circumstances and regulations in which the mine is operating, local factors such as climate and soil structure and the overall financial planning policy of the operating company. Nevertheless the need exists to recognise, and plan for, abandonment and rehabilitation measures and to take these into account in the initial design of the scheme.

A mine plan which, from the outset, considers the total cost of tailings disposal and abandonment costs will highlight areas where alternative engineering or disposal operations may result in lower overall operating cost. Typical examples might include early diversion of watercourses which would minimise placement costs and long-term environmental control, or the strategic stock piling of cover materials stripped from the site and which could effect savings in importation of material at the time of closure.

Various disposal plans should be critically examined to produce, where possible, an inter-related technical, environmental and restoration scheme resulting in minimal closure costs when production ceases.

6.3. PRINCIPAUX OBJECTIFS

Les mesures d'abandon et de réhabilitation seront mieux définies si l'attention est fixée sur les objectifs à atteindre. Les facteurs locaux climatiques, géotechniques et topographiques feront ressortir les diverses priorités, mais, en général, les objectifs principaux sont les suivants :

- a) **Stabilisation de la retenue de stockage** : cela concerne, sur le long terme, la stabilité, la sismologie, la protection contre l'érosion, les dispositifs de drainage.
- b) **Hydrologie** : évaluation, à long terme, des apports du bassin versant et des ouvrages de dérivation, y compris le risque de déversement et de brèche.
- c) **Pollution** : contrôle ou collecte des eaux de lessivage, qualité des eaux de surface et de percolation, contrôle des émissions de gaz, contrôle des poussières.
- d) **Impact visuel** : relief du sol, mise en place de terre végétale et plantation, aspect paysager général.
- e) **Utilisations futures** : loisirs, activités agricoles ou commerciales.
- f) **Sécurité** : accès public et dangers inhérents, surveillance et auscultation à long terme.

Les aspects liés à chacun de ces objectifs se chevaucheront inévitablement. Par exemple, les plantations choisies pour la restauration et l'amélioration du paysage peuvent assurer une protection satisfaisante contre l'érosion et contribuer à la stabilisation à long terme des talus extérieurs de la retenue de stockage. De même, une retenue conçue pour bien s'intégrer au site ne nécessitera pas ultérieurement d'importantes modifications de forme.

6.4. STABILISATION

6.4.1. Stabilité des talus

Le facteur, sans doute le plus important, concernant la stabilité du remblai au cours de l'exploitation de la retenue de stockage est le contrôle de l'eau et, intrinsèquement, de la ligne de saturation. Lorsque la mise en dépôt prend fin, les percolations à travers les stériles continueront, la ligne de saturation s'abaissant jusqu'à ce que les conditions d'équilibre soient atteintes. Naturellement, cela suppose qu'il n'est pas nécessaire de maintenir une tranche d'eau sur les stériles pour des raisons de toxicité, et également que des mesures adéquates ont été prises pour dériver ou évacuer les eaux de ruissellement provenant du bassin versant naturel.

Il s'ensuit que la stabilité à long terme du remblai n'est pas une question très préoccupante après l'abandon si le remblai a été stable au cours de la période d'exploitation. Néanmoins, on devra tenir compte des effets éventuels des travaux futurs sur la stabilité à long terme du remblai. Comme exemples, on peut citer :

- a) l'exploitation d'une nouvelle mine à proximité de la retenue de stockage abandonnée ;

6.3. PRINCIPAL OBJECTIVES

Abandonment and rehabilitation measures can be more clearly identified if attention is focused upon the objectives which they are intended to achieve. Local climatological, geotechnical and topographical factors will determine the emphasis to be placed on each priority but in general, the key objectives are:

- a) **Stabilisation of the impoundment:** this will involve consideration of long term stability, seismology, erosion protection, drainage systems.
- b) **Hydrology:** long term assessment of catchment runoff and diversion arrangements, including risk of overtopping and breaching.
- c) **Contamination:** including leachate control or containment, surface and seepage water quality, emission control and dust hazard.
- d) **Visual impact:** ground contouring, planting and soiling, and general landscape measures.
- e) **Afteruse considerations:** including restoration for leisure, agricultural or commercial enterprise.
- f) **Safety:** public accessibility and inherent dangers, long term surveillance and monitoring.

The considerations embodied in each of these objectives will inevitably overlap to some degree. For example, carefully selected species for restoration and landscaping planting may well provide adequate erosion protection to aid long term stabilisation of the outer slopes of the impoundment. Similarly, an impoundment designed to be sympathetic to the natural landforms in which it is situated will minimise the need for major recontouring later in its life.

6.4. STABILISATION

6.4.1. Slope stability

Possibly the most important factor bearing upon the stability of the embankment during the operation of the impoundment is the control of water and, intrinsically the phreatic surface. When disposal ceases, seepage through the residues will naturally continue resulting in a drop in phreatic surface until equilibrium conditions have been achieved. This, of course, assumes that there is no requirement for toxicological reasons to retain a cover of water on the tailings, and also assumes that adequate measures have been taken to divert or discharge surface water arising from the natural catchment.

It follows that the long term stability of the embankment is not normally a cause for major concern after abandonment if the embankment itself was stable during its operating life. Nevertheless, the effect of any future works that can be identified at the time of abandonment and which may influence the long term stability of the embankment should be considered, examples of which might include:

- a) the development of a new mine adjacent to the abandoned impoundment

b) la formation d'une retenue d'eau près de la retenue de stériles, ce qui peut conduire à une remontée de la nappe phréatique ou réduire le drainage des eaux provenant des stériles stockés.

6.4.2. Séismologie

Comme dans le cas de la stabilité des talus, la diminution progressive du degré de saturation des stériles stockés fera que les dépôts seront moins sujets à des glissements ou à une rupture par liquéfaction, comparativement à la situation en cours de stockage où ce degré de saturation est élevé. Le risque d'une rupture en masse du remblai sous l'effet d'une forte secousse sismique n'est pas plus prévisible que lors de la période d'exploitation de la retenue de stockage ; si le remblai a été conçu pour résister à de tels séismes, le danger n'est donc pas plus grave après l'abandon.

6.4.3. Protection contre l'érosion

La protection des talus extérieurs du remblai contre l'érosion par le vent ou la pluie fait souvent partie du programme de protection du paysage ou de contrôle à long terme des poussières, qui est examiné plus loin. La réalisation de risbermes et de fossés de collecte sur le talus du barrage et le long des appuis pour dissiper l'énergie de l'écoulement des eaux de pluie dans les ravinelements est souhaitable.

Si les risbermes ont une légère pente vers l'axe du barrage, le risque de déversement localisé et d'érosion concentrée sera réduit ; lorsque les risbermes ont une pente longitudinale, pour des raisons d'accès ou de vue, on doit veiller à éviter des affouillements dus à l'écoulement de l'eau le long du bord intérieur. L'adoption de caniveaux semi-circulaires permet d'éviter une telle érosion.

La mise en place de terre végétale, la pose de paillis, l'ensemencement ou la plantation directe de gazons ou d'arbustes - en dehors de toute nécessité d'amélioration visuelle - constituent généralement des moyens satisfaisants pour réduire l'érosion de surface, d'autres mesures plus coûteuses existant cependant : protection en graviers ou cailloux, diminution de la pente des talus extérieurs du remblai.

6.4.4. Dispositifs de drainage

Les drains doivent continuer à fonctionner correctement afin de diminuer la teneur en eau résiduelle et d'évacuer les eaux de percolation, en particulier lorsque ces drains ont été mis en place sous le remblai pour collecter des eaux de source.

Les drains sont souvent constitués de débris de roche associés à diverses couches de matériaux ou à un géotextile ; on doit examiner le risque d'obstruction de ces drains ou de diminution de leur capacité drainante par suite de la fragmentation des matériaux constitutifs. Lors de la fermeture du stockage, les points de collecte des eaux de surface et des eaux recueillies par les drains profonds seront simplifiés, et les chambres de collecte seront conçues pour minimiser l'entretien du dispositif de drainage. Des appareils de mesure des débits, ou des seuils avec entaille en V, seront installés, le cas échéant, pour la surveillance à long terme.

b) the development of a water storage lagoon near the impoundment which might result in a raising of the groundwater table or restrict drainage from the impoundment itself.

6.4.2. Seismology

As in the case of slope stability, the progressive reduction in the degree of saturation of the retained tailings will normally render the deposits less susceptible to flow slides or failure through liquefaction than they were in the highly saturated state during the disposal operation. The effect of mass failure of the embankment resulting from a major seismic shock will of course be no more predictable than it was during the life of the impoundment and, therefore if the original embankment had been designed for such effects, the risk is no more severe after abandonment.

6.4.3. Erosion protection

Protection of the outer embankment slopes against the effects of erosion - both wind and rain-induced - is frequently considered as part of a landscaping or long term dust control programme, which is discussed elsewhere. Nevertheless, the introduction of benches and catchwaters on the face of the dam and along the mitres to break up the destructive effect of rainwater channelled into erosion furrows can be of benefit.

If benches are graded with a slight cillfall towards the central axis of the dam, local overspilling and concentration of erosion will be reduced, but if the benches also have a longitudinal fall introduced for access, or for visual reasons, care must be taken to avoid undercutting of the upper slope through channelling of runoff along the inner edge. Half round channels or troughs can effectively be used to prevent erosion from this cause.

Progressive soiling, mulching, hydroseeding or straightforward planting of grasses or shrubs - if not required in any event for visual amelioration - is normally accepted as a satisfactory means of limiting surface erosion, although more costly measures may include the provision of gravel or cobble protection or major flattening of the outer slopes of the embankment.

6.4.4. Drainage systems

The drains must continue to perform effectively to continue to remove residual moisture and percolation, especially when underdrains have been laid to convey spring water from beneath the embankment or impoundment.

Drains are often constructed of waste rock combined with a zoned material or geotextile, and the possibility of these drains clogging or becoming less effective due to comminution of the drainage material should be considered. At the time of closure both surface water and underdrainage systems outlet points should be simplified, and collecting chambers rationalised to minimise the need for ongoing maintenance of the drainage system. Flow recorders or v-notch weirs, if not already in place, should be installed for long term monitoring and surveillance.

6.5. HYDROLOGIE

Certes l'emplacement de la retenue de stockage aura une influence sur le choix de la crue de projet à prendre en compte pour la durée d'exploitation de la retenue ; mais, il n'est pas irréaliste de considérer que la période d'exploitation de l'ouvrage se limitera à une ou deux décennies. Les évacuateurs de crue, les ouvrages de dérivation provisoire et les ouvrages de décantation, chacun d'une durée de service plus courte que cette période, ne seront pas, en général, conçus pour une crue aussi sévère que la crue maximale probable (PMF). Si les ouvrages hydrauliques de contrôle sont dimensionnés pour une crue conduisant à un risque faible et acceptable de déversement pendant l'exploitation de la retenue de stockage, par contre, pour les mêmes conditions de dimensionnement, le risque de rupture sera beaucoup plus grand si l'on considère la période postérieure à l'abandon, beaucoup plus longue que la période d'exploitation.

Par exemple, si l'aménagement en exploitation comprend des canaux de dérivation autour de l'ouvrage, il sera probablement nécessaire de les agrandir et de les renforcer lorsque l'aménagement sera abandonné. Les fossés de collecte ou canaux creusés périodiquement, suivant les besoins, au-dessus des stériles pendant leur montée, sont parfois non revêtus ou de capacité limitée ; il sera souvent nécessaire de revêtir l'ouvrage de dérivation définitif, de le dimensionner au débit maximal de projet, et de le construire de façon à réduire son entretien. Cela est particulièrement vrai pour les ouvrages de chute ou cascades dérivant les eaux depuis un niveau élevé jusqu'au lit originel du cours d'eau à l'aval du remblai, où l'installation d'un dissipateur d'énergie peut s'avérer nécessaire. Lorsqu'un ouvrage approprié de décantation ou de déversement existe, on peut envisager, après achèvement de l'aménagement, de dériver les eaux sur la masse des stériles mis en dépôt, puis à travers l'ouvrage de décantation proprement dit. Une tour de décantation, suivie d'une conduite passant sous la retenue de stériles et le barrage, n'est généralement pas considérée comme acceptable, en raison du risque de rupture de la conduite et/ou de son obstruction par des transports solides.

De toute façon, il est essentiel de s'assurer de la capacité hydraulique du canal de dérivation ou de l'ouvrage de décantation par rapport à l'orage de projet contre lequel il faut se protéger à long terme. Un tel orage peut être plus violent que celui qui était acceptable au cours de la période temporaire de mise en dépôt ; l'ouvrage de décantation n'aura pas été nécessairement conçu pour évacuer la crue exceptionnelle de projet mais seulement une partie du ruissellement en plus d'un certain volume du liquide surnageant dans la retenue.

Le choix de la crue de projet, correspondant aux deux périodes « avant » et « après » fermeture, dépendra du risque de rupture et des conséquences : perte de vies humaines, effets sur l'environnement, pertes économiques. Le chapitre 3 traite des facteurs de projet ; si des circonstances particulières permettent parfois d'admettre un risque plus élevé au cours de l'exploitation de l'aménagement, les considérations à long terme s'appuieront sur des critères bien établis, tels que ceux utilisés au Royaume-Uni pour les réservoirs et présentés dans le document « Crues et Sécurité des Réservoirs » (1978).

Des règlements dans plusieurs pays exigent d'adopter à peu près les mêmes critères hydrologiques et sismiques pour la période d'exploitation et celle suivant

6.5. HYDROLOGY

Although the location and situation of the impoundment will have a bearing on the choice of design flood to be catered for during its operational life it is not unrealistic to consider the operating structure having a finite life of perhaps a decade or two. Operating spillways, temporary diversion channels and decant systems, each having lives of considerably less than this period would not normally be designed for anything as severe as the probable maximum flood (PMF). However, water control systems designed for a flood that will produce an acceptably low risk of overtopping in the operational life of the impoundment will inevitably be found to produce a far higher risk of failure if assessed for the same flood condition over a post abandonment period which would be far greater than the operating life.

For example, if the operating scheme included diversion channels around the structure, it is probable that these will need to be extended and strengthened when the scheme is abandoned. Catchwaters, or channels excavated as necessary around contours from time to time above the rising tailings may well have been unlined or of limited capacity; the final diversion may well need to be lined, with a capacity appropriate to the maximum design flood and constructed in such a way to minimise maintenance. This factor is particularly true of drop structures or cascades returning the diversion from a high level to the original stream bed below the embankment where the introduction of a permanent hydraulic energy dissipator may be necessary. An alternative arrangement can sometimes be made when suitable decant or overflow arrangements exist, to divert the watercourse on completion of the scheme on to the body of stored tailings and thence through the decant structure itself. A decant tower with a culvert passing under the impoundment and dam, is not usually considered suitable, because of the risk of culvert collapse and/or blockage by debris.

However, in either case it is essential to confirm the hydraulic capacity of the diversion channel or decant system in relation to the design storm against which the long term condition of the structure must be assessed. Such a storm may well be more severe than that which was appropriate during the temporary life of the repository; decant systems would not necessarily have been designed to carry the worst design flood, but only a proportion of run off together with a quantity of supernatant liquor from the pond.

The selection of design flood both before, and after, closure will depend upon the risk of failure and the consequential effects relating to loss of life, environmental contamination and economic loss. Reference is made in Chapter 3 to design factors, and whilst special circumstances may permit a higher degree of risk during the operation of the scheme, long term considerations will normally be based on established criteria such as those used for reservoirs in the United Kingdom and discussed in "Floods and Reservoir Safety" (1978).

Regulations in many regions require almost the same flood and seismic criteria during operation as after closure. This is particularly true where the structures

la fermeture. Cela est particulièrement vrai lorsque les ouvrages sont de grandes dimensions et que leur rupture risque de conduire à des pertes élevées de vies humaines et à de sérieux dégâts sur l'environnement.

Dans le cas de grands barrages de stériles, la pratique courante est de prévoir un évacuateur à crête libre pour maîtriser la crue maximale probable (associé à un surremplissage du réservoir). Les dispositifs de pompage et de décantation ne sont généralement pas acceptables pour des crues de très longues périodes de retour.

6.6. POLLUTION

Dans la plupart des cas, les effets nuisibles sur l'environnement résulteront de la pollution des eaux due aux percolations à travers les stériles mis en dépôt, ou de la contamination des eaux de ruissellement entraînant la pollution des cours d'eau à l'aval. Dans certains cas, on devra prendre des mesures spéciales pour réduire ou éliminer le développement des percolations polluantes, ou pour réduire les émissions de radiations ou de gaz radon se produisant lors du séchage des stériles d'uranium abandonnés. Ces sujets ont été examinés par Fillion (1984) et Ward (1985). Il y a le cas particulier des retenues dont l'étanchéité a dû être totale et qui ne donnent naissance à aucune perte d'eau après la période d'exploitation.

6.6.1. Maîtrise des percolations

Il importe que le dispositif de drainage situé à l'intérieur du remblai ou dans la fondation soit parfaitement conçu pour continuer à fonctionner sur une longue période après l'abandon du dépôt. Des réservoirs de collecte et des points de prise d'échantillons seront prévus pour contrôler la qualité des eaux de percolation souterraine et de ruissellement recueillies par les drains. Les chambres de prise d'échantillons seront suffisamment dimensionnées pour permettre l'accès et le prélèvement d'échantillons.

En général, les percolations provenant des stériles mis en dépôt diminueront après la fermeture et la qualité de l'eau s'améliorera, sauf dans certains cas où une oxydation des minerais contenus dans les stériles (par exemple, des pyrites) se produit au fur et à mesure que le degré de saturation des stériles baisse (Garga et al., 1983). Cependant, la quantité de matériaux nécessaire à l'obtention d'une pente de la couverture d'au moins 0,5 % est importante, et les stériles eux-mêmes ne pourront être retravaillés que lorsqu'une dessiccation suffisante aura été obtenue.

6.6.2. Qualité des eaux de surface

Si toute l'eau de ruissellement provenant du bassin versant est dérivée autour de la retenue de stériles, la qualité de l'eau ne posera pas de problème majeur, à moins que des produits polluants ne soient captés sur le bassin versant avoisinant et par le ruissellement sur une retenue de stockage complètement endiguée. L'écoulement continu d'eau sur le dépôt de stériles et dans l'ouvrage de décantation ou de déversement, et spécialement dans les canaux à écoulement libre, peut entraîner des particules fines et conduire à des niveaux inacceptables de coloration ou de transport solide lors de périodes de ruissellement intense.

are large and their failure could cause large loss of life and severe environmental damage.

Current practice on major tailings dams is to provide free crested spillways to handle the PMF (when combined with reservoir storage by surcharging) after the mine is shut down. Pumping and decant systems are usually unacceptable over very long return periods of time.

6.6. CONTAMINATION

In most situations ongoing risks to the environment will result from water-borne contamination arising from seepage through the deposited tailings or contaminated runoff causing pollution of downstream watercourses. In certain circumstances however, special measures will need to be introduced either to limit, or capture the development of polluting leachate or to limit radiation and radon gas emissions associated with the drying out of abandoned uranium tailings. These matters have been discussed by Filion (1984) and Ward (1985). There is a special case for lagoons which have had to be completely sealed, from which virtually no post operational drainage takes place.

6.6.1. Seepage control

It is essential that any drainage system that will be buried within the embankment or foundation is designed in such a way that it will continue to function long after the scheme has been abandoned. Collection chambers and sampling points, if not already in place, will need to be introduced in order to monitor water quality both from underground seepage and surface water drainage systems. Sampling chambers should be of adequate size for access and for taking bucket samples.

Natural seepage from the deposited tailings will be expected to reduce after abandonment and therefore seepage water quality would generally be expected to improve except in certain situations where oxidation of minerals in the tailings (for example, pyrites) occurs as the tailings become unsaturated (Garga et al 1983). However, the quantities of material required to produce a capped slope of a minimum of 1:200 is significant, and reworking of the tailings themselves can only take place once adequate desiccation has occurred.

6.6.2. Surface water quality

If all surface water arising from the catchment is diverted around the impoundment, water quality should not be a major problem unless contaminants are picked up from the surrounding catchment or from runoff from a fully dyked impoundment. Continued water movement across the deposited tailings, and into the decant or overflow system, especially in uncontrolled channels, can pick up finer particles and lead to unacceptable levels of colour or suspended solids following periods of high runoff.

L'installation d'un bassin tampon ou bassin de sédimentation entre l'exutoire des drains et le cours d'eau naturel devient de plus en plus une obligation pour répondre aux dispositions réglementaires d'évacuation ; une telle installation sera même prévue pour la période d'exploitation afin de constituer une zone d'évacuation de secours en cas de pollution.

6.6.3. Contrôle des poussières

A moins qu'elle ne soit traitée ou revégétalisée, la surface des stériles et du barrage lui-même peut être recouverte de poussières au fur et à mesure que les stériles sèchent. La végétation est en général choisie pour stabiliser la surface des stériles, bien que des produits chimiques aient été également utilisés à cet effet, mais ils nécessitent une application périodique (Morrison et Simmons, 1977). L'arrosage ou la constitution d'une réserve d'eau sur la surface n'est vraiment possible que si une quantité d'eau suffisante est disponible, ou s'il est intéressant de stocker l'eau de traitement sur la retenue de stériles abandonnée, sans que le maintien d'une ligne de saturation élevée dans la masse des stériles soit dangereux. Des dispositifs d'irrigation (Bengson, 1978) sont parfois nécessaires pour entretenir la végétation sur les stériles dans les climats arides.

6.7. IMPACT VISUEL

L'impact visuel de l'aménagement achevé dépendra, dans une large mesure, de la forme topographique de la retenue conçue lors de l'étape préliminaire de projet ; mais on est de plus en plus conscient de la nécessité d'adoucir la forme obtenue, au moyen de plantations judicieuses et du morcellement de la retenue au moyen d'écrans d'arbres et de haies dans les zones où un tel traitement se mariera harmonieusement avec la topographie naturelle. Dans les régions arides, on veillera à choisir des espèces de plantes assurant rapidement une couverture végétale, avec un ensemencement nécessitant un minimum de préparation du sol et d'apport d'engrais (Day, 1978). Les conditions varient d'un site à l'autre ; une masse de stériles s'élevant bien au-dessus du sol naturel donnera un milieu ne convenant qu'à des plantations totalement différentes des plantations indigènes, ce qui conduira souvent à un coût élevé de traitement du sol et de préparation de la couche de semis pour l'obtention des plantations destinées à la restauration du paysage, à la maîtrise de l'érosion et à la stabilisation du sol.

Il faut cependant signaler que de bons résultats ont été obtenus sur des stériles provenant de kaolin et de granite altéré près de la surface, sans procéder à la mise en place d'une couche d'humus ou à un traitement préalable important, en associant des espèces locales à des arbustes fixant l'azote. Même dans ce cas, la présence de produits chimiques résiduels de traitement peut réduire le domaine des espèces susceptibles de pousser.

Une opération bien programmée permettra d'entreprendre des essais de plantation et de constituer une pépinière dès le début des travaux ; on pourra ainsi, en association avec le programme de restauration du paysage, mettre en œuvre un programme de plantation en prélevant dans la pépinière des plants convenant aux conditions locales et présentant un développement suffisant.

The provision of a buffer lagoon or settling pond situated between the drainage outlet and natural watercourse is increasingly becoming a requirement in order to meet regulatory discharge consents and should always be considered even during the operation of the scheme if only to provide an area for emergency discharge or dumping in circumstances where pollution may otherwise occur.

6.6.3. Dust control

Unless soiled or revegetated, the surface of the tailings and the embankment itself can become especially prone to dusting as the tailings dry out. Revegetation is usually the preferred means of stabilising the surface of the tailings although, as described by Morrison and Simmons (1977), chemical stabilisers - which require reapplication from time to time - have been used. Surface wetting or ponding is really only feasible where there is an adequate supply of water, or where there may be advantage in storing processed water on the abandoned impoundment and where in any event there is no disadvantage in maintaining a high phreatic surface in the body of the tailings. Irrigation techniques such as those discussed by Bengson (1978), are nevertheless sometimes necessary to support vegetation on tailings in arid climates.

6.7. VISUAL IMPACT

The landform of the impoundment devised during the initial design stage will largely dominate the visual impact of the completed scheme but there is an increasing awareness of the need to soften the completed form by means of ingenious planting and partitioning of the impoundment with tree screens and hedgerows in those areas where such treatment would blend with the natural topography. In arid regions attention will be focused on a selection of plant species that will provide rapid cover and seed production with the minimum of surface pretreatment and nutrient enhancement (Day 1978). Circumstances vary from site to site; the deposition of a mass of tailings arising from well below the natural soil mantle may produce a growing medium wholly alien to the indigenous plant species of the area, and in consequence, costly methods of soil conditioning and seed bed preparation may be necessary to support the planting required both for landscaping purposes and for erosion control and stabilisation.

By contrast, satisfactory results have been achieved in tailings derived from near surface weathered granite and kaolins without the need for surface mulching or significant pretreatment, using a combination of local species together with nitrogen fixing shrubs. Even so, the presence of residual process chemicals can limit the range of tolerant species.

A well planned operation will allow for the initiation of planting trials and a subsequent development of nursery stock from the outset of the scheme so that, coupled with a definitive landscaping plan, a progressive programme of planting can be implemented using stock suited to the prevailing conditions and of reasonable maturity.

6.8. RESTAURATION

La prise en compte des activités futures fera partie du programme global de restauration et dépendra, dans une large mesure, de facteurs locaux et économiques, de la topographie et de la population. Par exemple, à l'intérieur d'un vaste complexe minier où la retenue de stockage constitue un des nombreux ouvrages de même type, il est peu probable qu'une restauration importante soit immédiatement nécessaire, en particulier s'il est possible de retravailler ultérieurement les stériles pour en extraire une nouvelle fraction de produit marchand.

Les utilisations futures les plus probables pour lesquelles une restauration peut être entreprise comprennent des activités de loisirs - pouvant consister en une intégration harmonieuse au paysage environnant - ou des activités agricoles lorsque la retenue de stockage abandonnée est utilisable pour des récoltes de céréales, l'élevage de bétail ou de maigres pâturages pour moutons.

Même si le programme initial de restauration a tenu compte des principales utilisations futures, il est souvent impossible de prévoir les facteurs économiques et les souhaits des collectivités locales qui existeront quelques années après, à l'époque de la fermeture du dépôt. Tout programme doit donc présenter une certaine souplesse et il est recommandé de prendre contact avec les collectivités concernées par les propositions d'utilisations futures.

6.9. SÉCURITÉ

6.9.1. Accès public

A un certain moment, une décision importante doit être prise entre diverses solutions : interdire, décourager ou permettre l'accès du public aux ouvrages abandonnés. A l'intérieur des limites d'une exploitation minière, il est peu probable que le public s'intéresse à une retenue de stockage de stériles abandonnée ; par contre, une zone isolée avec un relief harmonieusement restauré peut devenir un habitat pour les animaux sauvages, ce qui encouragera les visites du public pour l'observation de la faune, des promenades à pied ou des pique-niques.

Les bassins de collecte des eaux, les déversoirs et les eaux stagnantes - constituant d'excellents habitats aquatiques mais aussi de dangereuses zones de sables mouvants - doivent être convenablement entretenus et surveillés, compte tenu de la réglementation locale en vigueur.

La responsabilité d'un ouvrage abandonné incombe parfois aux autorités de contrôle locales et non au propriétaire de la mine, auquel cas les problèmes de sécurité et d'accès seront examinés et feront l'objet d'un accord avant la fermeture définitive du dépôt.

Les règlements relatifs aux dépôts de stériles sont examinés au chapitre 7 ; mais il faut noter que si la retenue de stériles est délibérément recouverte d'eau, comme prévu dans le programme de restauration, la retenue d'eau ainsi constituée relève de la législation applicable aux réservoirs, à laquelle la retenue de stériles initiale n'était pas soumise.

6.8. RESTORATION

Consideration of afteruse activities should be considered as part of the masterplanning operation and will depend to a great extent on a combination of local and commercial considerations, topography and population. For example, within an extensive mine complex where the impoundment may form one of many such structures, it is unlikely that any significant restoration will be immediately required, especially if there is a possibility of reworking the tailings at a later date to extract a further fraction of saleable product.

The most likely afteruses to which restoration might be tailored are those of passive leisure activities - which may simply mean restoration sympathetic to the surrounding landscape - or for agriculture where the abandoned impoundment might be used to support cereal crops, cattle or coarse grazing for sheep.

Although principal afteruses may well have been addressed as part of an initial masterplan, it is frequently impossible to predict commercial pressures and community desires which may be present at the time closure takes place some years after the initial concept was formulated. Any plan must therefore retain a degree of flexibility and, it is suggested, communicated to those authorities who have an interest in, or who may be affected by, the after use proposals.

6.9. SAFETY

6.9.1. Public access

At some stage, a fundamental decision must be made whether or not to exclude, discourage, or permit public access to the abandoned structure. Within the boundary of an operating mine complex, an abandoned impoundment is unlikely to attract much attention from the public but an isolated and sympathetically restored landform may become a habitat for wildlife which itself may encourage visits from the public for watching, walking or picnicking.

Collection chambers, overflow structures and residual ponds -which can provide excellent wetland habitats but also hazardous areas of quicksand - must perforce be adequately secured and maintained depending upon the prevalent local legislation.

It is possible that the responsibility for an abandoned structure rests with the Local Authority or Agency and not with the mine owner, in which case matters of security and access should be appropriately discussed and agreed prior to final closure.

Regulations concerning tailings disposal are addressed in Chapter 7 but it is relevant to note here that if, as part of the restoration programme the impoundment is intentionally flooded, it may be that the resulting water body falls within the ambit of legislation related to reservoirs to which, as an impoundment it would not previously have been subject.

6.9.2. Auscultation et surveillance

Le plan de fermeture et de restauration doit inclure l'obligation d'une auscultation et d'une surveillance continues. Le chapitre 7 donne l'exemple de la législation en vigueur au Royaume-Uni, imposant une inspection et l'établissement d'un rapport par un personnel compétent et responsable.

En général, un programme d'auscultation et de surveillance comprendra au moins les éléments suivants :

- a) fréquence des mesures et de l'établissement d'un rapport sur les résultats d'auscultation (piézomètres, mesures des déplacements, etc.) ;
- b) mesures des débits de percolation évacués par les drains et des eaux de ruissellement déversées ;
- c) fréquence des entretiens courants : réparation des bourbiers de surface, des rigoles creusées par érosion, des clôtures ;
- d) inspection de l'état des canaux, des ouvrages de décantation, du remblai, de la végétation, des ouvrages périphériques et des ouvrages auxiliaires ;
- e) inspections de sécurité portant sur la retenue de stockage afin de détecter des percolations et mouvements anormaux, ou des signes d'instabilité ;
- f) rapports à adresser au propriétaire et/ou aux autorités responsables.

6.9.2. Monitoring and surveillance

The closure and rehabilitation plan must address the requirement for ongoing monitoring and safety inspections. Chapter 7 refers to typical legislation in the United Kingdom under which routine inspection and reporting is undertaken by competent and responsible personnel.

A monitoring and surveillance plan will normally include reference at least to:

- a) Frequency of recording and reporting on instrumentation (piezometers, movement indicators etc).
- b) Measurement of seepage flows and discharges from underdrains and surface water overflows.
- c) Frequency of routine maintenance: repair of surface sloughs, erosion gully, fencing.
- d) Condition surveys, of channels, decant structures general embankment condition, vegetation, peripheral and ancillary structures.
- e) Safety inspections, examining the impoundment for unusual seepage, movement or major instability.
- f) Reporting system to owner and/or responsible Authority or Legislative Agency.

7. RÉGLEMENTATION

Le projet, la construction, l'exploitation, l'abandon et la restauration des barrages de stériles sont normalement soumis à une législation et à un contrôle afin de s'assurer que la mise en dépôt des stériles se fait en toute sécurité et en respectant les conditions d'environnement. La réglementation peut émaner du droit international, d'une loi nationale ou fédérale, d'une loi votée par un état ou une province. Les autorités nationales, régionales ou locales chargées de l'application des règlements sont généralement précisées par la loi.

Le Bulletin 74 « Sécurité des barrages de stériles - Recommandations » souligne que de nombreux pays ne possèdent pas de législation relative aux barrages de stériles et présente des recommandations pour l'élaboration et l'application d'une telle législation. Le présent chapitre traite de la législation et des dispositions réglementaires concernant la mise en dépôt des stériles, en donnant comme exemple celles en vigueur au Royaume-Uni. Certains aspects des règlements appliqués dans d'autres pays sont également mentionnés.

Au Royaume-Uni, la mise en dépôt des stériles rentre dans un cadre législatif complexe, comprenant trois chapitres principaux

- plan d'utilisation des sols,
- contrôle de la pollution,
- sécurité.

Ces dispositions de contrôle sont indépendantes et élaborées de façon à ne pas faire double emploi. Alors que la législation concernant les deux premiers points précités fait peu mention (si ce n'est aucunement) des dépôts de stériles, celle relative à la sécurité examine le cas des dépôts à l'état liquide. Étant donné que les deux premiers chapitres précisent le cadre dans lequel s'applique la législation relative à la sécurité, et que les contrôles interviennent généralement dans l'ordre indiqué ci-dessus, ces divers chapitres sont également présentés ci-après dans cet ordre.

7.1. ROYAUME-UNI : LÉGISLATION RELATIVE À LA PLANIFICATION

Cette législation relative à la planification est contenue dans le Décret de 1990 « Town and Country Planning Act » (loi amendée) et les règlements correspondants. Cette législation porte sur le contrôle de la mise en valeur et de l'utilisation des sols dans l'intérêt public. L'exigence fondamentale est que cette mise en valeur (bâtiments, aménagements techniques, exploitations minières, etc.) ne peut être entreprise sans l'autorisation des autorités locales compétentes. L'objectif est de s'assurer que le programme de mise en valeur des terres est acceptable, plutôt que de contrôler cette mise en valeur proprement dite. Cela suppose également que d'autres contrôles réglementaires s'appliqueront.

7. REGULATIONS

The design, construction, operation, abandonment and rehabilitation of tailings dams is normally carried out within a framework of legislation and policy to ensure that tailings are disposed in a safe and environmentally acceptable manner. The regulations involved may arise from international, national or federal, and state or provincial law. The relevant national, regional or local authority responsible for the execution and enforcement of regulations is usually specified within the legislation.

Bulletin 74 (1989) 'Tailings Dam Safety: Guidelines' highlights an apparent lack in many countries of specific regulatory legislation relating to tailings dams and suggests guidelines for drafting and enacting such legislation. This chapter describes the legislative and policy framework within which tailings disposal is carried out with specific reference to the United Kingdom. Brief examples are also given of some aspects of the regulations in other countries.

Tailings disposal in the United Kingdom operates within a complex legislative framework which can be considered under three main headings:

- land-use planning;
- pollution control; and
- safety.

These are independent control systems which are not intended to duplicate each other. Whilst the legislation relating to planning and pollution control contains little if any reference to tailings disposal as such, that relating to safety does contain references to liquid tips (i.e. tailings lagoons). However, since the other two elements set the context within which the safety law operates and since the controls generally operate approximately in the order listed above, they are briefly discussed in that order.

7.1. UNITED KINGDOM PLANNING LAW

UK planning law is contained in the Town and Country Planning Act 1990, as amended, and subordinate legislation. It aims to control development and the use of land in the public interest. The fundamental requirement is that development, including building, engineering, mining or other operations in, on, over or under land, may not be undertaken without planning permission from the appropriate local planning authority. The role of the planning system focuses on whether the development itself is an acceptable use of the land rather than the control of the development itself. It also assumes that other statutory controls will operate effectively.

Alors que la législation ne fait pas spécifiquement mention des dépôts de stériles, la loi de planification générale s'applique au cas particulier des travaux miniers, y compris la mise en dépôt des stériles miniers, en s'appuyant sur les Règlements de 1971 « Town and Country Planning (Minerals) Regulations ».

Le cadre dans lequel les décisions sont prises est défini par :

- le guide de la politique de planification nationale («national planning policy guidance») et le guide de planification minière («minerals planning guidance»);
- le guide stratégique régional («regional strategic guidance»);
- les programmes de mise en valeur comprenant :
 - a) la politique et les plans d'utilisation des sols;
 - b) les programmes locaux, à l'échelle du district, précisant les objectifs et faisant des propositions;
 - c) les programmes locaux miniers concernant spécifiquement l'extraction des minerais et la mise en dépôt des stériles en résultant;
 - d) les programmes locaux concernant spécifiquement la mise en dépôt des déchets, ainsi que le définit la Directive de la Communauté Européenne sur les Déchets (déchets domestiques, commerciaux et industriels).

La décision d'autorisation doit tenir compte du programme de mise en valeur et d'utilisation des sols. Parmi les aspects importants concernant la mise en dépôt des stériles, on peut mentionner :

- la disponibilité du sol pour la mise en dépôt des stériles, tenant compte de la proximité d'autres zones dont la mise en valeur ou l'utilisation peut être affectée;
- la sensibilité de la zone, en ce qui concerne les effets sur le paysage, la qualité des terres agricoles, la conservation du milieu naturel ou des vestiges archéologiques;
- tous effets bénéfiques dans le domaine socio-économique;
- les effets nuisibles sur l'environnement : par exemple, bruit, poussières, fumées, trafic;
- la possibilité de contamination du sol, d'évacuation d'effluents ou d'émissions toxiques, dans la mesure où elles ont des effets sur l'utilisation des terres ne rentrant pas dans le cadre de la loi relative au contrôle de la pollution;
- la stabilité du sol et de la retenue de stériles, examinée sous l'angle de ses effets sur l'utilisation du sol, ce qui n'est pas à proprement parler abordé dans la loi relative à la sécurité;
- les utilisations ultérieures proposées pour le site et les moyens permettant de satisfaire aux prescriptions.

L'autorisation peut être accordée sous réserve des conditions jugées acceptables par les autorités locales ou le Secrétaire d'État compétent ; ces conditions

Whilst the legislation contains no specific reference to tailings disposal, the general planning law is adapted to the special needs of mineral workings including the disposal of mineral wastes, by the Town and Country Planning (Minerals) Regulations 1971.

The framework within which decisions are taken is provided by:

- national planning policy guidance (PPGs) and minerals planning guidance (MPGs);
- regional strategic guidance;
- development plans comprising:
 - a) structure plans containing strategic land-use policies;
 - b) district-wide local plans containing detailed policies and proposals;
 - c) minerals local plans specifically concerned with the extraction of minerals and the disposal of wastes arising;
 - d) waste local plans specifically concerned with the disposal of wastes as defined in the European Community Framework Directive on Waste (largely household, commercial and industrial waste).

The decision whether to grant planning permission must have regard to the development plan, in so far as material to the application, and to any other material consideration, relating directly to the physical development and use of land. Material considerations with respect to tailings disposal may include, inter alia:

- the availability of land for tailings disposal, taking into account its proximity to other development or land use which may be affected;
- the sensitivity of the area, particularly as reflected in landscape, agricultural land quality, nature conservation or archaeological designations;
- any particular environmental economic or social benefits;
- the environmental impact in terms of, e.g. noise, dust, fumes, traffic;
- the possibility of land contamination, effluent discharges or toxic releases to the extent that they have land-use implications which are not properly the concern of pollution control law;
- the stability of the ground and of the tailings lagoon in terms of land-use implications not properly the concern of the safety law; and
- the proposed after-use of the site and feasibility of achieving the required standard.

Permission may be granted subject to such conditions as the local planning authority or the relevant Secretary of State think fit, provided they are necessary,

doivent concerner la planification, la mise en valeur autorisée, être exécutoires, précises et acceptables sous tous les autres aspects. En particulier, les conditions de planification ne seront généralement pas applicables aux problèmes de contrôle relevant d'autres administrations.

7.1.1. Évaluation des effets sur l'environnement

La réglementation de 1988 « Town and Country Planning Regulations 1988 » (Evaluation des Effets sur l'Environnement) fait suite à la Directive de la Communauté Européenne relative à l'évaluation des effets sur l'environnement. La plupart des activités minières et des travaux de mise en dépôt des stériles sont indiqués dans l'Annexe 2 de cette réglementation, c'est-à-dire les opérations pour lesquelles une étude d'impact n'est pas obligatoire mais peut être exigée par les autorités locales si l'aménagement proposé risque d'avoir des effets importants sur l'environnement en raison de sa nature, de ses dimensions ou de son emplacement.

La réglementation exige que les effets sur l'environnement (par exemple, impact visuel, bruit, poussière, impact écologique et impact sur les écoulements de surface) soient identifiés et évalués, et que des mesures d'atténuation soient proposées dans le dossier d'impact. Les problèmes de stabilité et les risques aux tiers, le cas échéant, peuvent être traités dans le dossier d'impact ou dans les documents accompagnant la demande d'autorisation.

7.2. ROYAUME-UNI : LÉGISLATION RELATIVE AU CONTRÔLE DE LA POLLUTION

Cette législation sur le contrôle de la pollution est essentiellement contenue dans le Décret sur l'Eau, de 1989 (Water Act 1989), et maintenant dans le Décret sur les Ressources en Eau, de 1991 (Water Resources Act 1991), et dans le Décret sur les Aménagements Hydrauliques, de 1991 (Water Industry Act 1991), ainsi que dans les Parties I et II du Décret sur la Protection de l'Environnement, de 1990 (Environmental Protection Act 1990), et les règlements correspondants. Conformément à cette législation, les contrôles de la pollution sont du ressort d'un certain nombre d'organismes et font appel à diverses procédures, comprenant les procédures de concession et d'autorisation relatives aux activités ou matières présentant des dangers pour l'environnement. Bien que la mise en dépôt de stériles ne soit pas spécifiquement mentionnée, de nombreuses activités produisent des déchets de caractéristiques identiques aux stériles et qui sont également mis en dépôt dans des retenues.

7.2.1. Contrôle global de la pollution

Conformément à la Partie I du Décret de 1990 sur la Protection de l'Environnement, les activités industrielles présentant un risque élevé de pollution sont soumises à un contrôle global de la pollution, sous l'autorité de l'Inspection de la Pollution de Sa Majesté. Le contrôle s'applique à un vaste domaine d'activités : usines de combustion, usines métallurgiques, aciéries, fonderies, usines de métaux non ferreux, etc. Les exploitants de telles installations doivent obtenir une autorisation de l'Inspection sus-nommée avant la mise en service de l'usine. Lors de leur demande d'autorisation, ils doivent fournir une étude d'impact sur l'air, l'eau et le sol.

relevant to planning, relevant to the development to be permitted, enforceable, precise and reasonable in all other respects. In particular, planning conditions would not normally be appropriate to control matters which are subject to other statutory controls.

7.1.1. Environmental assessment

The Town and Country Planning (Assessment of Environmental Effects) Regulations 1988 implement the European Community Directive on Assessment of Environmental Effects. Most forms of mineral working and waste disposal are included in Schedule 2, i.e. those developments for which an environmental assessment is not mandatory but may be required by the local planning authority if the proposed development is likely to have a significant effect on the environment by virtue of its nature, size or location.

The Regulations require that the environmental effects (e.g. visual impact, noise, dust, ecological impact and impact on surface drainage) are investigated, their impacts assessed and mitigating measures put forward in the environmental statement. Stability and risk to third parties, where relevant, may be dealt with in the environmental statement or in documentation accompanying the application for planning permission.

7.2. UNITED KINGDOM POLLUTION CONTROL LAW

UK law on the control of pollution is essentially contained in the Water Act 1989 (now mainly consolidated into the Water Resources Act 1991 and the Water Industry Act 1991) and Parts I and II of the Environmental Protection Act 1990 and subordinate legislation. Under this legislation, pollution controls are administered by a number of organisations and through a variety of mechanisms, including licensing and authorization procedures applied to processes or substances which can have potentially harmful effects on the environment. Whilst there is no specific reference to tailings disposal, many of the processes involve the production of wastes with similar characteristics to tailings and which are similarly disposed in lagoons.

7.2.1. Integrated pollution control

Under Part I of the Environmental Protection Act 1990, industrial processes with the greatest pollution potential are subject to integrated pollution control, regulated by Her Majesty's Inspectorate of Pollution (HMIP). A wide range of processes are covered, including large combustion plant, iron and steel and smelting processes, non-ferrous metal processes and others. Operators of such processes must have a prior authorization from HMIP before a plant can operate. In seeking authorization they are required to consider the total impact of all releases to air, water and land.

Avant de délivrer cette autorisation, l'Inspection doit s'assurer que :

- l'exploitant utilise les meilleures techniques disponibles, d'un coût acceptable (best available techniques non entailing excessive cost - BATNEEC), afin d'empêcher ou réduire la production des matières indiquées ;
- lorsque ces matières concernent plusieurs milieux, l'exploitant doit s'assurer que les techniques précitées (BATNEEC) sont utilisées pour réduire la pollution de l'environnement considéré dans son ensemble, compte tenu de la solution environnementale la plus satisfaisante ;
- les autorisations comprennent, le cas échéant, les conditions conformes aux instructions du Secrétaire d'État, en vue de satisfaire aux obligations internationales ou de la Communauté Européenne, ou à toute autre réglementation concernant la qualité de l'environnement.

L'Inspection de la Pollution a établi un guide pratique détaillé sur le contrôle global de la pollution et l'Inspecteur en Chef, après consultation des industriels et autres organismes concernés, a publié environ 200 notes d'information sur les procédures à suivre.

7.2.2. Qualité de l'air

Les activités industrielles, en dehors du domaine du contrôle global de la pollution, sont soumises au contrôle de la pollution de l'air par les autorités locales (Local Authority Air Pollution Control), et également à la Partie I du Décret sur la Protection de l'Environnement (Environmental Protection Act). Les mêmes principes et procédures s'appliquent, indépendamment de la nécessité d'obtenir la meilleure solution environnementale (ces contrôles concernant seulement la pollution de l'air). Les Conseils des Districts sont également responsables de l'exécution des contrôles de fumées, d'impuretés et de poussières, relevant du Décret sur l'Air Pur, de 1993 (Clean Air Act 1993), incluant les contrôles de poussières, vapeurs, odeurs et autres émanations survenant dans des zones d'activités industrielles ou commerciales, et préjudiciables à la santé.

7.2.3. Qualité de l'eau

L'Administration Nationale des Rivières (National Rivers Authority - NRA), créée par le Décret sur l'Eau, de 1989, est responsable de la conservation et de la mise en valeur des ressources en eau, de l'autorisation de prélèvement d'eau et du contrôle de la qualité de l'eau et de la pollution des eaux contrôlées. Ces eaux comprennent la mer jusqu'à une distance de trois miles des côtes, les estuaires, l'eau des nappes souterraines et la plupart des lacs, étangs, réservoirs, rivières et autres cours d'eau. Les contrôles portent sur les décharges provenant d'activités non soumises au contrôle global de pollution, ainsi que sur celles associées aux installations d'alimentation en eau et d'évacuation des eaux usées, et autres. Il incombe ainsi à l'Administration de s'assurer que les objectifs de qualité de l'eau fixés par le Gouvernement et les Directives de la Communauté Européenne sont atteints.

Sauf rares dispenses précisées dans le Décret, il y a infraction lorsqu'une personne ne possédant pas d'autorisation de décharge provoque ou permet, en toute connaissance de cause :

In granting authorizations, HMIP has a duty to ensure that:

- the operator is using the best available techniques not entailing excessive cost (BATNEEC) to prevent or minimise releases of prescribed substances;
- where a process involves releases to more than one medium the operator must ensure BATNEEC is used to minimise pollution to the environment as a whole, having regard to the best practicable environmental option; and
- authorizations where necessary include conditions to secure compliance with directions from the Secretary of State to implement European Community or international obligations or any statutory environmental quality standards or objectives.

A detailed practical guide to integrated pollution control has been published by HMIP and the Chief Inspector is issuing around 200 process-specific guidance notes following detailed consultation with industry and other interested bodies.

7.2.2. Air quality

Industrial processes outside the scope of integrated pollution control are covered by Local Authority Air Pollution Control, also under Part I of the Environmental Protection Act. The same general principles and procedures apply, apart from the need to achieve the best practicable environmental option (since these controls are concerned only with air pollution). District Councils are also responsible for enforcing the smoke, grit and dust controls of the Clean Air Act 1993, including the control of any dust, steam, smell or other effluvia arising on industrial, trade or business premises which are prejudicial to health.

7.2.3. Water quality

The National Rivers Authority (NRA), established by the Water Act 1989, is responsible for the conservation and enhancement of water resources, for licensing water abstraction and for the control of water quality and of pollution in respect of controlled waters. Controlled waters includes the sea up to the three mile limit, estuaries, water contained in underground strata and most lakes, ponds, reservoirs, rivers and other watercourses. It controls discharges from processes not covered by integrated pollution control as well as from water and sewerage companies and other dischargers. In doing so it has a duty to ensure, as far as practicable, that water quality objectives set by Government and EC Directives are achieved.

Subject to limited exemptions detailed in the Act, it is an offence, inter alia, for a person without a discharge licence to cause or knowingly permit:

- l'entrée de matières toxiques, nocives ou polluantes, ou autres déchets solides, dans des eaux contrôlées (ruisseaux, rivières, étangs, lacs, etc., eaux souterraines, eaux territoriales ou littorales),

- l'entrée de toutes matières, de quelque nature qu'elles soient, dans les eaux fluviales, susceptible de perturber l'écoulement et de conduire à une aggravation importante

- a) de la pollution due à d'autres causes,

- b) ou des conséquences de la pollution.

Une distinction est généralement faite entre une entrée due à un événement accidentel (par exemple, apports résultant d'une rupture d'une retenue de stockage), et une évacuation de caractère permanent (en provenance de la retenue). L'Administration sus-nommée (NRA) a également le pouvoir d'exécuter certains travaux pour empêcher, supprimer ou atténuer la pollution ou une source possible de pollution, et de recouvrer les dépenses auprès de la personne en cause.

Tout organisme susceptible de procéder à des décharges doit en demander l'autorisation auprès de l'Administration (à moins qu'il ne soit autorisé par ailleurs à exécuter des décharges, par exemple sous contrôle global de la pollution ou suivant des procédures de gestion des déchets). L'Administration fixe, en général, des conditions aux autorisations de décharge, permettant de contrôler la qualité et la quantité des effluents à évacuer : nature, origine, composition, température, volume autorisé, cadence et périodes de décharge. Une autorisation de décharge précisera également les lieux possibles de décharge et pourra donner des prescriptions détaillées sur le prélèvement d'échantillons, les mesures de contrôle, la tenue à jour et la présentation des résultats. En précisant les limites de l'autorisation de décharge, l'Administration tiendra compte de tous les facteurs utiles : qualité, débit et capacité du cours d'eau récepteur, objectifs de qualité de la rivière fixés par le Gouvernement et les Directives de la Communauté Européenne.

7.2.4. Gestion des déchets

Conformément à la Partie II du Décret sur la Protection de l'Environnement, de 1990, et aux Règlements s'y rattachant, la mise en dépôt de « déchets contrôlés » (déchets domestiques, commerciaux et industriels) est soumise au contrôle des autorités responsables (Waste Regulatory Authorities). Les résidus minéraux ne rentrent pas dans la catégorie des déchets contrôlés et la mise en dépôt des stériles semble donc échapper à ces dispositions. Cependant, les déchets industriels, tels que les cendres volantes, les boues d'égoût, les matériaux de dragage, qui ont des caractéristiques identiques à des stériles minéraux, rentrent dans la catégorie des déchets contrôlés et sont soumis à une autorisation. Les principes s'appliquent aussi aux déchets minéraux du fait des contrôles effectués conformément à la législation sur l'eau et la planification.

Une autorisation de gestion de déchets est nécessaire pour procéder au traitement ou à la mise en dépôt des déchets contrôlés à l'intérieur ou sur une zone de terrain déterminée. Si un permis d'utilisation du sol est exigé pour un site, on doit l'obtenir avant que l'autorisation de gestion soit délivrée. Une demande d'autorisation sera rejetée lorsque :

- any poisonous, noxious or polluting matter or any solid waste matter to enter any controlled waters (normally taken to include all streams, rivers, pond and lakes, etc, underground waters and territorial or coastal waters); and
- any matter whatever to enter any inland waters so as to tend to impede the proper flow of the waters in a manner leading to or likely to lead to a substantial aggravation of
 - a) pollution due to other causes; or
 - b) the consequence of such pollution.

A distinction is usually drawn between an entry, which is taken to be a one-off event, e.g. inflow resulting from a lagoon failure, and a discharge, which is interpreted as a more continuous operation such as would normally occur from a lagoon. The NRA also has powers to carry out certain works to prevent, remove or mitigate the pollution or a potential source of pollution and to recover the costs from the appropriate person.

Any potential discharger must make an application to the NRA for consent to discharge (unless otherwise authorised to make the discharge, e.g. under the integrated pollution control or waste management procedures). The NRA usually attach conditions to discharge consents by which they control aspects of the quality and quantity of the effluent to be discharged. These may include the nature, origin, composition, temperature, and permitted volume, rate and periods of discharge. A discharge consent will also state the location at which the discharge may take place and may include detailed requirements for sampling and monitoring and the maintenance and submission of appropriate records. In determining the limits set on a discharge consent, the NRA will take account of all relevant factors including the quality, flow and capacity of the receiving watercourse and river quality objectives set by the Government and EC Directives.

7.2.4. Waste management

Under Part II of the Environmental Protection Act 1990 and subordinate Regulations, the disposal of “controlled wastes” (i.e. household, commercial and industrial waste) is subject to control by Waste Regulatory Authorities. Mineral wastes are not controlled wastes and tailings disposal would therefore seem to be exempt from these provisions. However, industrial process wastes, such as pulverised fuel ash and sewage sludge, and dredging spoil, which have similar characteristics to mineral tailings are controlled wastes and are subject to licensing. The principles are also applied to mineral wastes through the controls under the water and planning law.

A waste management licence is necessary to authorise the treatment, keeping or disposal of controlled waste in or on specified land. If planning permission is required for a site this must be obtained before the licence is issued. A licence application will be rejected only where

- le demandeur n'est pas une « personne qualifiée et compétente » (comme défini dans le Décret) ;
- il est nécessaire d'empêcher « la pollution de l'environnement » ou « les atteintes à la santé humaine » ;
- le permis d'utilisation du sol a été accordé avant l'entrée en vigueur de ces dispositions d'autorisation (1er mai 1994), « afin de prévenir tous effets nuisibles à la vie locale ».

Les conditions liées à une autorisation sont largement laissées à la discrétion de l'autorité responsable. Le Document n° 4 du Département de Gestion des Déchets affectant l'Environnement (Department of the Environment Waste Management) donne des instructions particulières aux autorités sur la procédure de délivrance des autorisations, instructions qu'elles sont statutairement tenues de suivre.

Le Décret sur la Protection de l'Environnement, de 1990, exige également que les autorités de contrôle des déchets établissent les dispositions de mise en dépôt des résidus, tenant compte des aspects de gestion. Le but est de définir la mission des autorités dans le domaine de l'application des règlements concernant les déchets, de recueillir des informations sur la production actuelle et future de déchets dans la zone considérée, sur les moyens disponibles et les besoins futurs probables. Les questions d'utilisation du sol, qui, conformément à la législation relative à la planification, dépendent du plan de mise en valeur, ne sont pas abordées.

7.3. ROYAUME-UNI : LÉGISLATION RELATIVE À LA SÉCURITÉ

Cette législation est essentiellement contenue dans le Décret sur la Santé et la Sécurité au Travail, etc., de 1974 (Health and Safety at Work etc. Act 1974) (loi amendée), et les règlements correspondants. Ce Décret a créé la Direction de la Santé et de la Sécurité (Health and Safety Executive - HSE), avec ses diverses Inspections agissant comme autorités de contrôle pour les zones d'activités. Il impose aux employeurs d'assurer la sécurité sur les lieux de travail : sécurité des employés, des visiteurs autorisés et du public au voisinage d'un lieu de travail.

Une autre législation plus spécifique est contenue dans le Décret sur les Mines et Carrières, de 1954 (Mines and Quarries Act 1954) et dans le Décret sur les Mines et Carrières (Dépôts), de 1969 (Mines and Quarries - Tips - Act 1969), et les règlements correspondants. Ce dernier Décret fut pris à la suite de la rupture du dépôt d'Aberfan et concerne plus spécifiquement les dépôts de stériles. Dans cette législation, l'expression « tip » (dépôt) désigne une accumulation ou dépôt de rejets d'une mine ou carrière (à l'état solide, ou en solution ou suspension), autre qu'une accumulation ou dépôt en souterrain.

La Partie I du Décret concerne la sécurité des dépôts en activité ou fermés, associés aux mines et carrières en exploitation, pour lesquels la Direction de la Santé et de la Sécurité (HSE) est l'autorité de contrôle ; la Partie II concerne la prévention du risque public associé aux dépôts désaffectés ne faisant pas partie de mines ou carrières en exploitation, et se trouvant sous la responsabilité des autorités locales.

- the applicant is not a “fit and proper person” (as defined in the Act);
- it is necessary to prevent “pollution of the environment” or “harm to human health”; or
- planning permission was granted before these licensing provisions came into force (1 May 1994), “for the purpose of preventing serious detriment to the amenities of the locality”.

There is wide discretion as to the conditions which the licensing authority might consider attaching to a licence. Department of the Environment Waste Management Paper No. 4 provides separate guidance to authorities on how they should carry out their licensing functions, which they are statutorily bound to heed.

The Environmental Protection Act 1990 also requires waste regulation authorities to draw up waste disposal plans concerned with the management aspects of waste disposal. Their purpose is to set out the authority’s policies regarding the discharge of its waste regulation functions and to gather information about the present and future generation of waste in the area, the availability of facilities and likely future needs. They do not address land use issues, which are specifically a function of the development plan under the planning legislation.

7.3. UNITED KINGDOM SAFETY LAW

UK safety law is essentially contained in the Health and Safety at Work etc Act 1974, as amended, and subordinate legislation. This Act established the Health and Safety Executive (HSE), with its various Inspectorates as the regulatory authority for places of work. It imposes a general duty on employers to maintain a safe working place with respect to the safety of employees, legitimate visitors and the public in the vicinity of a place of work.

Further and more specific legislation is included in the Mines and Quarries Act 1954 and the Mines and Quarries (Tips) Act 1969 and the relevant Regulations. The latter was introduced following the Aberfan tip failure and is much more specific to tailings disposal. It defines a tip as any accumulation or deposit of refuse from a mine or quarry (whether in solid state or in solution or suspension) other than an accumulation or deposit situated underground.

Part I of the Act relates to the security of active or closed tips associated with active mines and quarries, for which the HSE is the regulatory authority, and Part II relates to the prevention of public danger from disused tips not associated with active mines or quarries, for which local authorities are the responsible authority.

7.3.1. Dépôts relevant de la Partie I

Les Règlements des Mines et Carrières (Dépôts), de 1971, sont applicables aux dépôts de la Partie I si :

a) le dépôt est constitué de rejets accumulés ou déposés totalement, ou presque, à l'état solide et :

- i) la surface du sol recouverte par le dépôt dépasse 10 000 m²,
- ii) ou la hauteur du dépôt est supérieure à 15 m,
- iii) ou la pente moyenne du sol recouvert par le dépôt est supérieure à 1 sur 12 ;

b) le dépôt est constitué de rejets accumulés ou déposés totalement, ou presque, en solution ou suspension et :

- i) toute zone du dépôt (autre que l'ouvrage de retenue) a une hauteur de plus de 4 m au-dessus de tout point du sol environnant, situé à moins de 50 m du périmètre du dépôt,
- ii) ou le volume du dépôt (autre que l'ouvrage de retenue) dépasse 10 000 m³.

Les responsabilités et obligations du propriétaire de la carrière et de ses représentants désignés sont précisées dans plusieurs chapitres de la législation des Mines et Carrières. Tous les dépôts associés à une mine ou une carrière sont sous la responsabilité du propriétaire ou de son représentant (Chapitre 1) qui, en particulier, est responsable de la désignation des « personnes compétentes » chargées de la conception et de l'inspection régulière du dépôt, et chargées de signaler tous défauts au propriétaire, ou à l'Inspection si le dépôt présente une insécurité ou un risque d'insécurité, constituant un grave danger.

Les Règlements des Mines et Carrières (Dépôts), de 1971, donnent des détails sur les modalités d'inspection et de préparation des rapports, qui doivent être confiées à une personne compétente désignée par le propriétaire (Tableau 4), et sur le contenu des rapports, plans et chapitres (Tableau 5).

La législation fait souvent référence à une « Personne Compétente » : il s'agit d'une personne qui, compte tenu des tâches exigées, des facteurs intervenant, des problèmes à étudier et du niveau de risque ou danger, est jugée « compétente » par le propriétaire (maître d'ouvrage) pour accomplir ces tâches. Les Règlements conduisent à l'intervention de trois spécialistes :

- un ingénieur géotechnicien, ou ingénieur géologue, responsable de la préparation des rapports techniques et des spécifications de mise en dépôt ;
- un ingénieur chargé du contrôle général des travaux et responsable du contrôle des opérations de mise en dépôt, de l'installation et de l'entretien des dispositifs de drainage, et de la sécurité du dépôt ;
- un ingénieur responsable des inspections périodiques réglementaires.

7.3.1. Part I tips

Part I tips are classifiable under the Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 if:

a) the tip consists of refuse accumulated or deposited wholly or mainly in a solid state and:

- i) the area of land covered by the tip exceeds 10 000 m²; or
- ii) the height of the tip exceeds 15 m; or
- iii) the average gradient of land covered by the tip exceeds over 1 in 12;

b) the tip consists of refuse accumulated or deposited wholly or mainly in solution or suspension and:

- i) any part of the tip (other than the retaining structure) is more than 4 m above the level of any part of neighbouring land within 50 m of the perimeter of the tip; or
- ii) the volume of the tip (other than the retaining structure) exceeds 10 000 m³.

The responsibilities and duties of the quarry owner and his appointees are detailed within several sections of the Mines and Quarries legislation. The responsibility for all tips at a quarry or mine lies with the owner or his Section 1 appointee who, in particular, is responsible for the appointment of “competent persons” to undertake the design and regular inspection of a tip, including the reporting of any defects to the owner or, if the tip is or is likely to become insecure, to the Inspectorate, as a Dangerous Occurrence.

The Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 outline a comprehensive system of reporting and inspection which must be undertaken by a competent person appointed for the purpose by the owner (Table 4) and detail the content of reports, plans and sections required (Table 5).

The frequent reference in the legislation to the Competent Person has become accepted from case law as one who, on a fair assessment of the requirements of the task, the factors involved, the problems to be studied and the degree of risk or danger implicit can fairly, as well as reasonably, be regarded by the owner, as competent to perform such a task. Three activities or roles for a competent person can be inferred from the Regulations:

- a geotechnical engineer or engineering geologist responsible for preparing the technical reports and tipping rules;
- a supervising officer responsible for supervising tipping operations and the provision and maintenance of drainage systems and tip security; and
- an inspecting officer responsible for periodic inspections as required by the Regulations.

Tableau 4 – Sommaire des prescriptions d'inspection et d'établissement de rapports, conformément à la Partie I des Règlements des Mines et Carrières (Dépôts), de 1971 (Royaume-Uni)

Catégorie du dépôt	Personne responsable	Sommaire des responsabilités relevant de la réglementation relative aux dépôts	Fréquence recommandée pour les inspections ou prescriptions (d'après les recommandations applicables aux exploitations des carrières)
Dépôt en activité	Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé de l'inspection Propriétaire	Contrôle les opérations de mise en dépôt ; enregistre les défauts. Contrôle l'installation et l'entretien du dispositif de drainage ; enregistre les défauts. Contrôle la sécurité du dépôt ; enregistre les défauts. Inspection du dépôt et du drainage ; enregistrement des défauts. Prend des mesures pour remédier aux défauts ; enregistre les mesures prises.	Journellement ou par poste. Mensuellement. Journellement. Mensuellement. Suivant les besoins.
Dépôt classé dans la catégorie « en activité »	Propriétaire Maître d'œuvre Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé du contrôle général des travaux Ingénieur chargé du contrôle général des travaux	Se procure les plans/coupes topographiques, géologiques, de la zone de dépôt. Établit le dossier de projet du dépôt, incluant les règles de mise en dépôt. Contrôle les travaux de mise en dépôt ; enregistre les défauts. Contrôle l'installation et l'entretien du dispositif de drainage ; enregistre les défauts. Contrôle la sécurité du dépôt ; enregistre les défauts. Enregistre les données sur les résidus mis en dépôt.	30 jours avant le début de la mise en dépôt (1). Avant le début de la mise en dépôt (1). Journellement ou par poste. Chaque semaine, ou suivant prescription réglementaire. Journellement, ou suivant prescription réglementaire. Chaque semaine.

Table 4 – Summary of inspection and reporting requirements for tips under Part I of the Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 (United Kingdom).

Class of tip	Responsible person	Summary of responsibility under tips regulations	Recommended frequency of inspection or requirements (based on quarrying industry guidelines)
Active Tip	Supervising Officer	Supervise tipping operations, record defects.	Daily or shift.
	Supervising Officer	Supervise provision and maintenance of drainage system, record defects.	Monthly.
	Supervising Officer	Supervise making and keeping of tip secure, record defects.	Daily.
	Inspecting Officer	Inspection of tip and drainage, record defects.	Monthly
	Owner	Take action to remedy defects, record action taken.	As necessary.
Active Classified Tip	Owner	Obtain topographical, geological plans/sections for tip area.	30 days before tipping commences (1).
	Engineer	Produce report and design for tip including tipping rules.	Before tipping commences (1).
	Supervising Officer	Supervise tipping operations, record defects.	Daily or shift.
	Supervising Officer	Supervise provision and maintenance of drainage system, record defects.	Weekly or as specified by tipping rules.
	Supervising Officer	Supervise making and keeping tip secure, record defects.	Daily or as specified by tipping rules.
	Supervising Officer	Record data on refuse tipped.	Weekly.

Tableau 4 – Suite

Catégorie du dépôt	Personne responsable	Sommaire des responsabilités relevant de la réglementation relative aux dépôts	Fréquence recommandée pour les inspections ou prescriptions (d'après les recommandations applicables aux exploitations des carrières)
Dépôt classé dans la catégorie « en activité » (suite)	<p>Ingénieur chargé du contrôle général des travaux/Ingénieur chargé de l'inspection</p> <p>Ingénieur chargé de l'inspection</p> <p>Propriétaire</p> <p>Maître d'œuvre</p> <p>Directeur de la carrière</p>	<p>Dresse un inventaire des données sur les résidus mis en dépôt.</p> <p>Inspection du dépôt, du drainage et autres dispositifs, conformément aux règlements ; enregistrement des défauts.</p> <p>Prend des mesures pour remédier aux défauts ; enregistre les mesures prises.</p> <p>Confirme la conception et la sécurité du dépôt ; établit un rapport.</p> <p>Garde des copies de tous rapports, directives, plans, coupes, cartes géologiques, etc.</p>	<p>Chaque année.</p> <p>Chaque semaine (1).</p> <p>Suivant les besoins.</p> <p>Tous les 2 ans, après un « événement dangereux » ou un changement dans la conception/type de résidus (1).</p> <p>Inspecte le dépôt tous les 15 mois.</p>
Dépôt fermé	<p>Ingénieur chargé du contrôle général des travaux.</p> <p>Ingénieur chargé de l'inspection</p> <p>Propriétaire</p>	<p>Contrôle l'installation et l'entretien du dispositif de drainage, et la sécurité du dépôt ; enregistre les défauts.</p> <p>Inspecte le dépôt et le drainage ; enregistre les défauts</p> <p>Prend des mesures pour remédier aux défauts ; enregistre les mesures prises.</p>	<p>Tous les 6 mois.</p> <p>Tous les 6 mois</p> <p>Suivant les besoins.</p>

Table 4 – Continued

Class of tip	Responsible person	Summary of responsibility under tips regulations	Recommended frequency of inspection or requirements (based on quarrying industry guidelines)
Active Classified Tip (continued)	Supervising Officer/ Inspecting Officer	Compile data on refuse tipped.	Yearly.
	Inspecting Officer	Inspection of tip, drainage and other items as required by tipping rules, record defects.	Weekly (1).
	Owner	Take action to remedy defects, record action taken.	As necessary.
	Engineer	Confirm tip security and design, report.	2 yearly, after a "Dangerous Occurrence" or change in design/type of refuse (1).
	Quarry Manager	Keep copies of all reports, directives, plans, sections, geological maps, etc.	Survey tip every 15 months.
	Closed Tip	Supervising Officer	Supervise provision and maintenance of drainage system and keeping of tip secure, record defects.
Inspecting Officer		Inspection of tip and drainage, record defects.	6 monthly.
Owner		Take action to remedy defects, record action taken.	As necessary.

Tableau 4 – Suite

Catégorie du dépôt	Personne responsable	Sommaire des responsabilités relevant de la réglementation relative aux dépôts	Fréquence recommandée pour les inspections ou prescriptions (d'après les recommandations applicables aux exploitations des carrières)
Dépôt classé dans la catégorie « fermé »	Ingénieur chargé du contrôle général des travaux. Ingénieur chargé de l'inspection Propriétaire Maître d'œuvre Propriétaire Directeur de la carrière	Contrôle l'installation et l'entretien du dispositif de drainage, et la sécurité du dépôt ; enregistre les défauts. Inspecte le dépôt et le drainage ; enregistre les défauts. Prend des mesures pour remédier aux défauts ; enregistre les mesures prises. Établit un rapport confirmant la stabilité du dépôt. Assure l'enregistrement de toutes interventions sur le dépôt, pouvant affecter sa stabilité. Garde des copies de tous rapports, plans, coupes, etc.	Tous les 6 mois. Résidus liquides - 6 mois Résidus solides - 12 mois (1) Suivant les besoins. Résidus liquides - Tous les 5 ans. Résidus solides - Tous les 10 ans ou après un « événement dangereux » (1). Lorsqu'une intervention peut affecter la stabilité du dépôt (1). Inspection du dépôt et mise à jour, au moins tous les 15 mois (1).

Notes : (1) Prescription réglementaire ;

Le propriétaire (maître d'ouvrage) et le chef d'exploitation de la carrière sont définis statutairement ;

Le maître d'œuvre est habituellement un ingénieur géotechnicien ou un ingénieur géologue ;

L'ingénieur chargé du contrôle général des travaux/l'ingénieur chargé de l'inspection peuvent être le chef de carrière/le chef du puits de mine/le directeur de la carrière, suivant l'exploitation.

Table 4 – Continued.

Class of tip	Responsible person	Summary of responsibility under tips regulations	Recommended frequency of inspection or requirements (based on quarrying industry guidelines)
Closed Classified Tip	Supervising Officer	Supervise provision and maintenance of drainage system and keeping of tip secure, record defects.	6 monthly.
	Inspecting Officer	Inspect tip and drainage, record defects.	Liquid waste - 6 months; Solid waste - 12 months (1)
	Owner	Take action to remedy defects, record action taken.	As necessary.
	Engineer	Produce report confirming stability of tip.	Liquid waste - 5 yearly; Solid waste - 10 yearly; or after a "Dangerous Occurrence" (1).
	Owner	Ensure recording of any operations on tip which may affect stability.	When operation may affect tip stability (1).
	Quarry Manager	Keep copies of all reports, plans, sections, etc.	Tip survey and update at least every 15 months (1).

Notes : (1) Statutory requirement ;

Owner and Quarry Manager are defined by statute;

Engineer is commonly a geotechnical engineer or engineering geologist;

Supervising/Inspecting Officers may be Quarry Foreman/Pit Superintendent/Quarry Manager depending on the operation.

Tableau 5 – Principales prescriptions concernant le contenu des rapports, plans, etc., conformément aux Règlements - 1971 - des Mines et Carrières (Dépôts), et aux Règlements - 1971 - des Mines et Carrières (Plans de mise en dépôt) (Royaume-Uni).

Règlements applicables	Personne responsable	Documents requis	Sommaire des informations à inclure dans les documents requis
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 9 (1) Dépôt proposé, classé dans la catégorie « en activité »	Propriétaire	Carte géologique Coupes géologiques Plan topographique	Indiquant la géologie sous le dépôt et à l'intérieur d'un périmètre situé à 250 m du dépôt - Échelle $\geq 1/10\ 000$. Indiquant l'épaisseur et les caractéristiques des couches sous le dépôt - Échelle $\geq 1/1\ 250$. Échelle minimale 1/2 500 - Doit inclure la zone du dépôt et le terrain autour à une distance de 250 m. Le plan doit : i) comporter des lignes de niveau, être en corrélation avec le réseau du Service Topographique (grille de 100 m), ii) indiquer toutes les installations minières (abandonnées ou non), les anciens glissements de terrain, sources, puits artésiens, cours d'eau et autres particularités topographiques susceptibles d'affecter la sécurité du dépôt.
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 9 (2) Dépôt proposé, classé dans la catégorie « en activité »	Personne compétente - « Maître d'oeuvre » désigné par le Propriétaire	Rapport avant la construction	Méthode de mise en dépôt prévue. Toutes questions se rattachant à la sécurité de la fondation du dépôt. Toutes questions se rattachant à la sécurité du dépôt : - volume du dépôt projeté, - cadence moyenne hebdomadaire de mise en dépôt, - compte rendu des reconnaissances effectuées pour l'établissement du rapport, - détails sur la préparation du site, le drainage et les fondations du dépôt, - plans et coupes du projet complet, aux échelles 1/2 500 et 1/1 250 respectivement, donnant les détails du projet du dépôt, la nature et l'emplacement des divers types de rejets, etc., - nature et importance du contrôle et de l'inspection du dépôt (règles de mise en dépôt).

Table 5 – Principal requirements of contents of reports, plans, etc. under the Mines and Quarries (Tips) Regulations 1971 and the Mines and Quarries (Tipping Plans) Regulations 1971 (United Kingdom).

Relevant regulations	Responsible person	Required item	Summary of information to be included within required item
M & Q (Tips) Reg. 9 (1) Proposed Active Classified Tip	Owner	Geological map Geological cross sections Topographic plan	Showing geology below and within 250 m of tip, scale not less than 1/10 000. Showing thickness and character of strata beneath tip, scale not less than 1/1 250. Minimum scale 1/2 500, must include tip and surrounding ground for 250 m. Plan must: i) be contoured, correlated to Ordnance Survey grid, include 100m OS grid; and ii) Show all mine workings (whether abandoned or not), previous landslips, springs, artesian wells, watercourses, natural and other topographic features which could affect tip security.
M & Q (Tips) Reg. 9 (2) Proposed Active Classified Tip	Competent Person - "Engineer" appointed by Owner	Report prior to construction	Method of intended tipping Any matters of relevance to tip foundation security. Any matters of relevance to tip security - Designed tip capacity - Average weekly tipping rate - Account of all investigations undertaken for report - Details of site preparation, drainage and foundations of tip - Full design plans and sections at 1/2 500 and 1/1 250 respectively showing tip design details, nature and location of types of refuse etc - Required nature and extent of tip inspection and supervision (tipping rules).

Tableau 5 -- Suite

Règlements applicables	Personne responsable	Documents requis	Sommaire des informations à inclure dans les documents requis
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 12 (1) (2) Dépôt classé dans la catégorie « en activité »	Personne compétente - « Maître d'œuvre » désigné par le Propriétaire	Rapport, au minimum tous les 2 ans, ou après un changement de conception ou un événement dangereux	Toutes questions se rattachant à la sécurité du dépôt, incluant : - un avis sur la sécurité du dépôt, - un avis sur les changements éventuels dans la conception du dépôt ou dans la nature des résidus, éventuels de surface, susceptibles d'affecter la sécurité du dépôt, - compte rendu des reconnaissances effectuées pour l'établissement du rapport, - nature et importance du contrôle et de l'inspection du dépôt.
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 13 Mines et Carrières (Plans de la mise en dépôt) - Règlements Dépôt classé dans la catégorie « en activité »	Propriétaire	Conservation des plans, coupes, etc. mis à jour	Les prescriptions s'appliquent à la conservation des rapports, directives, plans et coupes, cartes géologiques, etc. Mise à jour du plan du dépôt et de la zone environnante : au minimum tous les 15 mois.
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 18 Dépôt classé dans la catégorie « fermé »	Personne compétente - « Maître d'œuvre » désigné par le Propriétaire.	Rapport, au minimum : - tous les 5 ans : dépôt liquide - tous les 10 ans : dépôt solide - après un événement dangereux	Toutes questions se rattachant à la sécurité des dépôts, incluant : - un avis sur la sécurité du dépôt, - des précisions sur les affaissements/mouvements de surface survenus et ayant pu affecter la sécurité du dépôt, - compte rendu des reconnaissances effectuées pour l'établissement du rapport, - nature et importance du contrôle et de l'inspection du dépôt.

Table 5 – Continued

Relevant regulations	Responsible person	Required item	Summary of information to be included within required item
M & Q (Tips) Reg. 12 (1) (2) Active Classified Tip	Competent Person - "Engineer" appointed by Owner	Report, minimum of every 2 years or after change of design or Dangerous Occurrence	All matters relevant to the security of the tip, including: - An opinion whether the tip is secure - An opinion whether there have been design changes to tip or nature of refuse - An opinion whether there has been or could be any subsidence or other surface movement likely to affect tip security - Account of any investigations undertaken for report - Nature and extent of tip inspection and supervision.
M & Q (Tips) Reg. 13 and M & Q (Tipping Plans) Regulations Active Classified Tip	Owner	Keeping of updated plans, sections, etc	Requirements include the keeping of reports, directives, plans and sections, geological map, etc Updating of plan of tip and surrounding area minimum every 15 months.
M & Q (Tips) Reg. 18 Closed Classified Tip	Competent Person - "Engineer" appointed by Owner	Report, minimum of every 5 years (liquid tip), 10 years (solid tip) and after any Dangerous Occurrence	All matters relevant to security of tip including: - An opinion whether the tip is secure - Details of subsidence/surface movement which has occurred likely to affect tip security - Account of any investigation undertaken for the report - Nature and extent of tip inspection and supervision

Tableau 5 – Suite

Règlements applicables	Personne responsable	Documents requis	Sommaire des informations à inclure dans les documents requis
Mines et Carrières (Dépôts) Règlement 20	Propriétaire	Conservation des plans, coupes, rapports, mis à jour	Les prescriptions s'appliquent à la conservation des rapports, directives, plans et coupes, géologie, comptes rendus de mise en dépôt et d'exploitation.
Mines et Carrières (Plans de la mise en dépôt) - Règlements			
Dépôt classé dans la catégorie « fermé »			

Table 5 – Continued

Relevant regulations	Responsible person	Required item	Summary of information to be included within required item
M & Q (Tips) Reg. 20 and M & Q (Tipping Plans) Regulations Closed Classified Tip	Owner	Keeping of updated report, plans, sections	Requirements include the keeping of reports, directives, plans and sections, geology, tipping and operating records.

7.3.2. Dépôts relevant de la Partie II

Conformément au Décret sur les Mines et Carrières (Dépôts), Partie II, les autorités locales, définies dans le Décret, sont responsables de la sécurité des dépôts désaffectés, non associés à une mine ou une carrière en exploitation, et doivent s'assurer que ces dépôts ne constituent pas un danger pour le public par suite d'instabilité.

Les autorités locales ont les pouvoirs pour :

- obtenir tous renseignements utiles sur la sécurité du dépôt et de ses fondations ;
- obtenir l'accès en vue de l'inspection du dépôt et de l'exécution de travaux de reconnaissances sur le site ;
- exiger du propriétaire du dépôt tous travaux de réparation nécessaires ;
- à défaut, obtenir l'accès et entreprendre tous travaux nécessaires de réparation et de restauration ;
- demander au propriétaire du dépôt le remboursement du coût des travaux de reconnaissances et de réparation.

7.3.3. Autre législation relative à la sécurité

Lorsque l'endiguement contient essentiellement de l'eau au-dessus du terrain naturel avoisinant, par exemple avant ou après la mise en dépôt des résidus de matériaux, la retenue peut également répondre à la définition de « grand réservoir », tel que mentionné dans le Décret sur les Réservoirs, de 1975, malgré l'exclusion des dépôts liquides de ce Décret. Cela peut se présenter lorsque l'ouvrage retient ou a été conçu pour retenir plus de 25 000 m³ d'eau au-dessus de tout point du terrain naturel adjacent. Les règlements applicables ont leurs modalités propres d'enregistrement, de conception et d'inspection.

Le Décret sur les Mines et Carrières (Dépôts), de 1969, ne s'applique pas aux dépôts de résidus non minéraux, tels que résidus industriels, cendres volantes, etc. Cependant, conformément au Décret sur la Santé et la Sécurité au Travail, etc., de 1974, la Direction de la Santé et de la Sécurité (HSE) a les pouvoirs d'imposer, si nécessaire, de semblables conditions à tous dépôts de cette nature.

7.4. RÈGLEMENTS DANS D'AUTRES PAYS

La brève synthèse présentée ci-dessus et concernant la législation en vigueur au Royaume-Uni et applicable à la mise en dépôt des stériles montre la complexité des dispositions mises au point sur plusieurs années et visant divers objectifs : utilisation du sol, contrôle de la pollution et sécurité des travailleurs et du public. Dans plusieurs pays, la réglementation relative à la mise en dépôt des stériles a été élaborée de la même façon. Comme au Royaume-Uni, les dispositions de contrôle s'attachent à désigner l'exploitant de la mine comme principal responsable de

7.3.2. Part II tips

Under Part II of the Mines and Quarries (Tips) Act the local authority, as defined in the Act, is responsible for ensuring that disused tips not associated with an active mine or quarry do not, by reason of instability, constitute a danger to members of the public.

Powers are available to the local authority to:

- obtain relevant records relating to the security of the tip and its foundations;
- obtain access to inspect the tip and carry out site investigations;
- instruct the owner of the tip to carry out whatever remedial measures it considers necessary;
- in default, obtain access and undertake necessary remedial and reinstatement works; and
- claim reimbursement from the owner of the tip for the costs of any investigation and remedial works required.

7.3.3. Other safety legislation

When an embankment lagoon primarily holds water above the surrounding natural ground, e.g. before or after the deposit of waste materials, it may also fall within the definition of a large raised reservoir as defined in the Reservoirs Act 1975, notwithstanding the exclusion of liquid tips from that Act. This could occur where the structure retained or was designed to retain more than 25 000 m³ of water above the natural level of any part of the adjoining land. The relevant Regulations has its own system of registration, design and inspection.

Tips of non-mineral wastes e.g. industrial process waste, pulverised fuel ash, etc are not covered by the Mines and Quarries (Tips) Act 1969. However, under the Health and Safety at Work etc Act 1974, the HSE has the power to impose similar conditions as necessary on any tips of a similar nature.

7.4. REGULATIONS IN OTHER COUNTRIES

The brief review above of United Kingdom legislation which may be applicable to tailings disposal illustrates the complexity of a system which has developed over many years and which has been approached from different objectives in terms of the use of land, the control of pollution and the safety of people at work and the general public. In many countries the regulation of tailings disposal has developed along broadly similar lines. As in the UK, systems of control attempt to place the primary responsibility for safety, control of pollution and restoration

la sécurité, du contrôle de la pollution et de la réhabilitation des sites, dans le cadre du programme d'utilisation du sol ou de l'étude environnementale.

Une préoccupation particulière a souvent été le contrôle de la dégradation de l'environnement résultant des travaux miniers et des activités associées. A cet effet, quelques pays ont ajouté des dispositions légales financières afin de garantir que les travaux de fermeture et de réhabilitation seront effectivement exécutés. Dans d'autres pays, en particulier ceux ayant élaboré les dispositions au cours de ces dernières années, il y a souvent des clauses d'exécution associées à une garantie ou caution financière.

De brefs exemples sont donnés ci-après. Ils visent seulement à illustrer quelques aspects des modalités d'application.

7.4.1. Communauté Européenne

Comme le Royaume-Uni, le reste de la Communauté Européenne est soumis aux Directives CE couvrant, par exemple, l'évaluation des effets sur l'environnement et la qualité de l'eau. Ces Directives sont mises en application par l'intermédiaire de la législation nationale qui varie d'un pays à l'autre, la législation pouvant concerner des questions qui ne sont pas couvertes par les Directives CE.

En Allemagne, la responsabilité principale incombe aux Landers (états) qui ont leur propre réglementation. En Rhénanie-Westphalie, les autorités des Mines jouent le rôle le plus important dans les domaines suivants : examen et approbation des plans d'extraction minière, y compris les plans de réhabilitation, inspection et mise en application de ces plans. Bien qu'aucune législation fédérale n'existe à cet effet, quelques exploitants de mines sont encouragés à fournir des garanties financières pour assurer les travaux de restauration.

En France, le Décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979 définit les minerais soumis au Décret, les modalités d'application, les renseignements à fournir à l'appui d'une demande et des dispositions relatives aux travaux de restauration. L'extraction minière et la mise en dépôt des stériles sont également soumises à des contrôles réglementaires dans le cadre du Code Minier et du Plan d'Occupation des Sols. Des cautions ou garanties financières peuvent être exigées.

Au Portugal, le Décret-loi 99/90 de 1990 comprend des dispositions relatives au contrôle des travaux d'exploitation minière et de restauration, incluant des pouvoirs concernant le cautionnement. Pour obtenir une concession d'exploitation, l'exploitant doit passer un contrat avec l'État et obtenir une autorisation pour les activités annexes.

En Espagne également, une garantie financière destinée à couvrir les travaux de restauration du site doit être déposée pour toutes exploitations minières au-dessus d'une certaine dimension.

En Italie, le C.M. n° 189/86 du Ministère de l'Industrie - Direction Générale des Mines, donne des instructions relatives à la conception, à l'exploitation et à la fermeture des barrages de stériles. Ces instructions s'appliquent aux barrages de hauteur supérieure à 10 m ou créant une retenue de stockage de plus de 10 000 m³ (ou à des retenues plus petites qui, de l'avis de l'ingénieur responsable du district minier, peuvent présenter des risques pour la sécurité).

of sites on the mineral operator within a land-use planning or environmental assessment framework.

A particular concern has often been to control the environmental degradation caused by mineral working and its associated activities. To this end some countries have added legal provision to their long-established planning system for financial guarantees to ensure that closure and rehabilitation is carried out effectively. In others, particularly those having arrangements developed in recent years, there are often detailed performance standards linked to financial guarantee or bond requirements.

Some brief examples are given below. These are not intended to be comprehensive but are intended merely to illustrate some of the aspects of relevance.

7.4.1. European Community

As with the United Kingdom, the rest of the European Community is bound by the terms of EC Directives covering, for example, environmental assessment and water quality. These directives are implemented through national legislation which varies between countries, as does the legislation concerned with matters which are not specifically covered by EC Directives.

In Germany, primary responsibility rests with the Lander (states), who have their own differing regulatory systems. In North Rhine-Westphalia, the Land mining authority plays the most important role of reviewing and approving mineral extraction plans, which include schemes of restoration, and inspecting and enforcing these plans. Although no federal legislation exists for the purpose, some mineral operators are encouraged to provide financial guarantees to ensure restoration.

In France, the Decret No. 79-1108 of 20 December 1979 defines the minerals covered by the Decret, the application procedures, the information required in support of an application and provision for restoration. Mineral extraction and waste disposal is also subject to policy controls within the Code Minier (mining code) and the relevant Plan d'Occupation des Sols (local plan). Powers exist to require bonds or financial guarantees.

In Portugal, Decree-Law 99/90 of 1990 includes provisions for the control of mineral working and restoration which includes powers for bonding. To gain an exploitation concession, operators must enter into a contract with the state and obtain a licence for ancillary operations.

In Spain, too, all mineral workings above a certain minimum size must have lodged a financial guarantee to cover site restoration.

In Italy, the C.M. No.189/86 of the Ministry of Industry -General Direction of Mines, defines directions for the design, operation and closure of tailings dams. Such directions apply to dams higher than 10 m or retaining an impoundment larger than 10 000 m³ (and to smaller impoundments that, in the opinion of the officer responsible for the mining district, can present risks for safety).

7.4.2. Afrique du Sud

Avant le milieu des années 1970, la législation sud-africaine relative aux travaux de réhabilitation et à la réduction, au minimum, des impacts des exploitations minières sur l'environnement est apparue inappropriée. Le Décret sur les Travaux Miniers (Mines and Works Act) fut pris à une époque où les exploitations minières de bancs de charbon connaissaient un important développement. Le Décret contenait des dispositions qui, entre autres :

- interdisaient l'évacuation d'eau contenant des matières dangereuses ;
- stipulaient de recouvrir les dépôts avec de la terre ou de la boue, ou de les traiter, de façon à empêcher la propagation de toute forme de pollution.

Des recommandations pour la réhabilitation de ces exploitations minières furent mises au point par la Chambre des Mines d'Afrique du Sud, acceptées par le Service Technique des Mines du Gouvernement et promulguées comme amendements au Décret en 1980. Elles portaient sur :

- le projet, l'exploitation et la fermeture des dépôts de stériles houillers et métallifères ;
- la végétalisation des dépôts de stériles, destinée à lutter contre l'érosion par le vent et l'eau.

Le Décret n° 50 (1991) sur les Minerais (Minerals Act) a remplacé le Décret sur les Travaux Miniers afin de réglementer l'utilisation et la réhabilitation de la surface du sol pendant et après les travaux de prospection et d'exploitation minières. A cet effet, la réglementation concerne :

- l'approbation préalable du plan des dispositions générales et du programme de réhabilitation ;
- la consultation d'autres Départements avant approbation ;
- l'application étendue à la fois aux exploitations minières à ciel ouvert et en souterrain.

Le Décret sur les Minerais a été amendé en vue d'inclure un Rapport relatif au Programme de Gestion de l'Environnement, ce qui doit permettre de s'assurer que les conséquences environnementales du projet de mise en valeur sont bien analysées et prises en compte dans l'étude du projet. Les objectifs de ce document sont les suivants :

- répondre aux prescriptions concernant l'environnement, contenues dans le Décret et la réglementation ;
- établir un document unique pour satisfaire les diverses autorités concernées par la réglementation relative aux effets des travaux minières sur l'environnement ;
- décrire la méthode d'exploitation minière et les activités associées, afin de permettre l'évaluation des impacts sur l'environnement pendant et après les travaux ;
- décrire les mesures envisagées pour la gestion de ces impacts ;

7.4.2. South Africa

Prior to the mid 1970s, South African legislation directed at rehabilitation and minimisation of environmental impacts from mining has been described as woefully inadequate. The Mines and Works Act was introduced at a time of major development of major coal strip mining operations. It contained provisions which, inter alia:

- prohibited the release of water containing injurious matter; and
- stipulated that dumps be covered with soil or sludge or otherwise dealt with to prevent the dissemination of any form of pollution.

Guidelines to provide for rehabilitation of these strip mines were developed by the South African Chamber of Mines, accepted by the Government Mining Engineer and promulgated as amendments to the Act in 1980. These included:

- The design, operation and closure of metalliferous and coal residue deposits; and
- The vegetation of residue deposits against wind and water erosion.

The Minerals Act No. 50 of 1991 replaced the Mines and Works Act to regulate the orderly utilisation and rehabilitation of the surface of the land during and after prospecting and mining operations. Statutory directives to attain this include:

- prior approval of the layout plan and rehabilitation programme;
- consultation with other Departments before approval; and
- extension to include both opencast and underground mining operations.

The Minerals Act has now been amended to provide for the inclusion of an Environmental Management Programme Report with the aim of ensuring that the environmental consequences of development proposals are understood and adequately considered in the planning process. The objectives of this document include:

- meeting the environmental requirements and directives of the Act and its regulations;
- providing a single document to satisfy the various authorities concerned with the regulation of the environmental impact of mining;
- describing mining method and associated activities to enable assessment of environmental impacts during and after mining;
- describing how environmental impacts will be managed;

- définir les critères de gestion de l'environnement destinés à s'assurer que les objectifs peuvent être atteints ;
- indiquer que l'on disposera de ressources suffisantes pour réaliser le programme de gestion environnementale.

7.4.3. Canada

La législation fédérale canadienne tend à être plus restreinte que la législation provinciale. Cependant, en vertu du Décret sur la Protection de l'Environnement - 1988 - (Canadian Environment Protection Act 1988) et du Décret sur l'Évaluation des Effets sur l'Environnement - 1992 - (Canadian Environmental Assessment Act 1992), la réglementation concernant l'environnement tient une place de plus en plus grande.

Dans l'Alberta, la législation sur la Sécurité des Barrages s'applique aux barrages de stériles.

En Colombie Britannique, le Décret sur le Développement des Activités Minières, de 1990 (Mine Development Assessment Act of 1990) fournit le cadre légal pour l'étude environnementale détaillée liée au développement prévu des activités minières.

Le Décret sur les Mines, de 1989 (Mines Act of 1989) régit toutes les activités minières et requiert :

- la soumission, avant le début de l'exploitation minière, du programme de travaux prévus et d'un programme de protection et de restauration des sols et des cours d'eau affectés par les travaux miniers ;
- l'obtention d'un permis de restauration ; un dépôt de garantie peut être exigé pour les travaux de restauration.

En 1992, le Décret sur les Mines a également institué le Code de Santé, de Sécurité et de Restauration pour les mines en Colombie Britannique, qui définit les mesures de restauration minière visant, en particulier, à :

- restituer les terres et les cours d'eau à un usage productif ;
- garantir que les ouvrages de stockage et les dépôts de déchets rocheux présentent une stabilité à long terme ;
- garantir que l'eau provenant d'un site minier présente une qualité acceptable.

Le drainage des roches acides est une préoccupation particulière ; la mise en dépôt sous l'eau des stériles et des déchets rocheux dans des ouvrages de stockage est souvent une mesure acceptable de prévention. L'adoption d'une telle mesure exige que :

- les résidus miniers ne contiennent pas de substances dangereuses facilement solubles ;
- le bilan hydraulique garantisse que tous déchets pouvant générer des matières acides seront continuellement recouverts d'eau ;

- setting out the environmental management criteria to ensure that agreed land capability and closure objectives can be achieved; and
- to indicate that resources will be made available to implement the environmental management programme.

7.4.3. Canada

Canadian federal legislation tends to be more restricted than provincial legislation. However, an increasing role in environmental regulation is being taken e.g. under the Canadian Environment Protection Act 1988 and the Canadian Environmental Assessment Act 1992.

In Alberta, the Dam Safety Legislation covers tailings dams.

In British Columbia, the Mine Development Assessment Act of 1990 provides the legal framework for comprehensive environmental assessment of proposed mine developments.

The Mines Act of 1989 governs all mining activities and requires the submission before mining commences of the proposed work plan and a programme for the protection and reclamation of the land and watercourses affected by a mine and the obtaining of a Reclamation Permit; a reclamation security deposit may be required.

In 1992, the Mines Act also established the Health, Safety and Reclamation Code for mines in British Columbia, which specifies mine reclamation standards including:

- returning the land and watercourses to a productive land use;
- ensuring that impoundment structures and waste rock dumps are stable over the long term; and
- ensuring that water quality released from a mine site is of an acceptable standard.

Acidic drainage is a particular concern and secure underwater disposal of tailings or waste rock in man-made structures is currently an acceptable form of prevention. Where this is proposed, the proponent must show that:

- the mine wastes do not contain readily soluble deleterious substances;
- the water balance ensures that all potentially acid-generating wastes will be continuously covered by water;

- il n'y ait pas d'effets importants résultant des vagues, de la glace, des avalanches, des crues, des séismes, des modifications thermiques et autres facteurs naturels ;

- la méthode de mise en dépôt, la profondeur d'eau et autres dispositions du projet assurent une prévention à long terme du drainage des roches acides.

La réglementation 114/91 de l'Ontario s'applique à l'exploitation et à la fermeture des mines conformément à la Partie IX du Décret sur les Mines de l'Ontario, de 1990. Elle exige, avant le début des travaux d'exploitation minière, la soumission d'un plan de fermeture, comprenant une garantie financière et fournissant entre autres les éléments suivants :

- renseignements sur la nature, l'emplacement et les dimensions prévues de toutes les zones de stockage des stériles et de tous les tas de minerai, concentré, roche, terrain de couverture et déchets ;

- conditions et utilisations prévues du site après la fermeture de l'exploitation et l'achèvement de tous les travaux de réhabilitation ;

- mesures particulières de réhabilitation à exécuter sur les zones de stockage des stériles, y compris les ouvrages annexes et dispositifs de traitement.

Les mesures minimales de réhabilitation, qui, dans certains cas, doivent être étudiées par un expert afin d'évaluer la stabilité à long terme des ouvrages, sont définies dans les situations suivantes de l'aménagement :

- Arrêt temporaire :

- tous les dispositifs de traitement des résidus seront entretenus, tous les programmes de surveillance seront poursuivis et tous les effluents contaminés seront contrôlés, comme l'exige le plan de fermeture ;

- tous les ouvrages de retenue de stériles et d'eau, tous les tas de roche et autres tas de stockage seront laissés dans des conditions de stabilité et de sécurité satisfaisantes.

- Inactivité :

- tous les sites de stockage des stériles, zones de dépôt de terre, et autres sites et dispositifs de traitement de déchets seront surveillés, entretenus ou mis hors service, comme l'exige le plan de fermeture ;

- tous les ouvrages de retenue de stériles et d'eau, tous les tas de roche, de terrain de couverture et autres tas de stockage seront laissés dans des conditions de stabilité et de sécurité satisfaisantes.

- Fermeture :

- tous les sites de dépôt de terre et autres sites de traitement de résidus seront réhabilités ;

- tous les sites de stockage de résidus, tas de roche et de terrain de couverture, et autres tas de stockage seront réhabilités ou traités afin d'assurer la stabilité, la protection contre l'érosion et la qualité des effluents ;

- there will be no significant impact as a result of wave action, ice, avalanches, flooding, earthquakes, thermal overturn and other relevant natural factors; and

- the mode of deposition, water depth and other design features satisfy the requirement for long-term prevention of acidic drainage.

Ontario Regulation 114/91 governs Mine development and Closure under Part IX of the Mining Act of Ontario of 1990. It requires the submission of a closure plan, including financial assurance, before mining commences which includes among other things:

- information on the nature, location and expected size of all tailings impoundment areas and all piles of ore, concentrate, rock, overburden and waste;

- the expected conditions and uses of the site and areas after the project has been closed out and all rehabilitation measures have been completed;

- specific rehabilitation measures to be carried out covering tailings impoundment areas, including associated structures and treatment systems.

Minimum rehabilitation standards, which must in certain cases be evaluated by a professional engineer to assess the long-term stability of the work, are specified for placing the project in a state of:

- temporary suspension:

- all waste management systems shall be maintained, all monitoring programmes continued and all contaminated effluents controlled as required by the closure plan; and

- all tailings and water impoundment structures and all rock piles and stockpiles shall be left in a stable and safe condition;

- inactivity:

- all tailings impoundment areas, landfill sites and other waste management sites and systems shall be monitored, maintained or decommissioned as required by the closure plan; and

- all tailings and water impoundment structures and all rock piles, overburden piles and stockpiles shall be left in a stable and safe condition; or

- closure:

- all landfill sites and other waste management sites shall be rehabilitated;

- all tailings impoundment areas, rock piles, overburden piles and stockpiles shall be rehabilitated or treated to ensure stability, erosion control and effluent quality;

- tous les ouvrages de stockage de stériles et d'eau, et autres ouvrages de contrôle seront entaillés d'une brèche ou renforcés afin d'assurer leur stabilité vis-à-vis des charges statiques et dynamiques auxquelles ils peuvent être soumis ;
- tous les cours d'eau du site seront rétablis dans leurs conditions originales, ou de nouvelles voies d'eau seront établies, ne nécessitant pas d'entretien dans le futur et répondant à l'utilisation prévue du sol ;
- tous les sites ayant subi des désordres seront revégétalisés, dans toute la mesure du possible.

La législation dans d'autres provinces est pratiquement identique, les prescriptions communes comprenant :

- l'étude d'impact sur l'environnement, avant le début des travaux miniers ;
- la réglementation relative à la qualité de l'eau, afin d'éviter toute pollution de l'eau par des déversements de matières nocives ;
- l'obligation pour les mines existantes et nouvelles de présenter des plans de fermeture visant à protéger l'environnement au cours de la durée de vie de l'aménagement et à réhabiliter le site après la fermeture de la mine ;
- l'obligation pour l'exploitant de la mine de réaliser des travaux de réhabilitation présentant toute sécurité dans le temps.

7.4.4. États-Unis

Aux États-Unis, les futurs exploitants de mines doivent solliciter des permis pour ouvrir ou agrandir une exploitation minière. La procédure est complexe et fait intervenir parfois de nombreuses juridictions et administrations. Les lois sur l'eau et l'air purs doivent être appliquées au même titre que les lois locales, des États, et Fédérales qui protègent d'autres ressources et valeurs naturelles. Si l'exploitation envisagée est située sur un site administré par le Gouvernement Fédéral (par exemple, l'US Forest Service ou le Bureau of Land Management), une étude d'impact sur l'environnement doit être effectuée. Quelques États exigent aussi une étude environnementale pour les projets miniers, quel que soit le propriétaire du sol.

La principale législation fédérale relative au contrôle des exploitations minières a été le Décret de 1977 « Surface Mining Control and Reclamation Act 1977 » qui se limite au charbon. Son but était l'établissement d'un programme national en vue de protéger la société et l'environnement contre les effets nuisibles des exploitations houillères à ciel ouvert. Il essaie de maintenir, à travers les États-Unis, un ensemble de mesures de remise en état pour les mines de charbon à ciel ouvert et stipule des obligations pour qu'on ne manque pas de remédier aux dégâts causés à l'environnement par les travaux miniers. Tous les exploitants doivent avoir un permis valide d'exploitation ; à cet effet, des renseignements très détaillés doivent être présentés sur le sol et l'écologie, sur le statut légal de l'exploitant, sa situation financière et son comportement devant la loi dans le passé, ainsi que sur les travaux d'exploitation minière et de remise en état proposés.

- all tailings, water and other control structures shall be either breached or made stable against any static and dynamic loading to which they may be subjected;
- all watercourses on site shall be either restored to their original courses or directed to new courses that will sustain themselves in the future without maintenance and that are consistent with the intended future use of the land; and
- all disturbed sites shall, to the extent practicable, be revegetated.

Legislation in other provinces is essentially similar, common requirements including:

- environmental impact assessment prior to commencement of mining;
- water quality regulation to prohibit anyone, without approval, to discharge a contaminant such that it may cause water pollution;
- the need for new and existing mines to file closure plans that address the protection of the environment during the life of the project and rehabilitation of the site upon mine closure; and
- the need for mining operations to put up security for the performance of rehabilitation work.

7.4.4. United States of America

In the United States, prospective mine operators must apply for permits to construct or expand a mining operation. The permitting process is multifaceted and can involve numerous political jurisdictions and agencies. Clean air and water laws must be complied with as well as a host of local, State and Federal laws which protect other resource and natural values. If the proposed operation is on land administered by the Federal Government (e.g. the US Forest Service or the Bureau of Land Management), an environmental assessment or environmental impact statement must be prepared. Some states also require some form of environmental analysis for mining proposals regardless of land ownership.

The major federal legislation relating to the control of mineral working has been the Surface Mining Control and Reclamation Act 1977, which is limited to coal. Its aim was to establish a nationwide programme to protect society and the environment from the adverse effects of surface coal mining operations. It attempts to maintain a set of minimum reclamation standards for surface-mined coal lands across the United States and provides for reclamation bonds as a guarantee against the failure to cure environmental damage resulting from mining. All operators must have a valid permit in order to mine and very detailed information must be submitted on the land and ecology, the operator's legal status, financial situation and past history of complying with the law, and the proposed mining and reclamation operations.

Conformément à ce Décret, chaque État est le principal responsable de la réglementation des travaux miniers en surface et de la remise en état. En retour, les divers États ont établi leur propre législation dont quelques exemples sont très brièvement donnés ci-après.

Dans le Dakota du Nord, l'ordonnance relative aux travaux miniers en surface et de remise en état concerne le permis d'exploitation et la procédure d'inspection ; elle est complétée par les règles de la Commission de Service Public s'appliquant à la remise en état des sols affectés par des travaux miniers en surface.

Le Dakota du Sud a adopté le Décret de 1983 sur la remise en état des terrains miniers (Mined Land Reclamation Act of 1983) s'appliquant à tous les minéraux organiques et inorganiques (excepté l'eau), aux produits pétroliers, gaz, sable, gravier ou roche destinée à être concassée pour utilisation dans la construction, pegmatite, calcaire, gypse, schiste argileux ou fer rentrant dans le processus de fabrication du ciment. L'exploitant est tenu de soumettre un projet qui doit être approuvé avant le début des travaux miniers.

Le Code de l'État du Montana - 1985 - indique les lois applicables aux travaux d'extraction à ciel ouvert : charbon et uranium (Chapitre 2), minerais métallifères (Chapitre 3), bentonite, argile, scorie, phosphate, roche et gravier (Chapitre 4).

Dans le Minnesota, les exploitations minières métallifères sont réglementées par la Loi C. 774-1 de 1969 de l'État du Minnesota, amendée en 1983 - C. 270 - 1 à 4 -, concernant la remise en état des sols exploités pour l'extraction de minerais métallifères et de tourbe. Le Département des Ressources Naturelles du Minnesota a adopté des règlements pour la remise en état des mines de fer et de taconite, et des mines de métaux non-ferreux. Les autorités locales peuvent établir des procédures de zonage et d'autorisation qui exigent des obligations et des preuves de réussite de la remise en état.

7.4.5. Australie

Comme en Amérique du Nord et dans d'autres pays, la législation australienne relative aux exploitations minières est appliquée au niveau de chaque État. Plusieurs États ont des prescriptions très détaillées concernant les barrages de stériles. Les principaux points couverts par la législation du Queensland sont mentionnés comme recommandations dans le document « Dam Safety Guidelines on Tailings Management », 1994 (voir liste de références).

7.5. REMARQUES FINALES

Le présent chapitre a essayé d'illustrer les types de règlement pouvant s'appliquer à la mise en dépôt de stériles, en se basant principalement sur l'exemple du Royaume-Uni et en donnant brièvement quelques exemples provenant d'autres pays et destinés à souligner les divers aspects de ces règlements. Les principaux aspects peuvent être pris en considération dans une législation générale faisant peu ou aucunement mention des dépôts de stériles, ou, plus généralement, dans une législation concernant le contrôle de l'extraction de minerais et spécialement la restauration des exploitations minières. Le recensement des pays autres que le Royaume-Uni s'est concentré sur ces aspects.

This Act gave each state the primary responsibility for regulating surface mining and reclamation. In response, individual states have enacted their own legislation and some very brief examples are given below.

In North Dakota, the Surface Mining and Reclamation Operations statute addresses the permitting and inspection process and is complemented by Public Service Commission Rules Governing the Reclamation of Surface-mined Lands.

South Dakota has developed the South Dakota Mined Land Reclamation Act of 1983 to cover all organic and inorganic minerals (except water), oil, gas, sand, gravel or rock to be crushed and used in construction, pegmatite minerals and limestone, gypsum, shale or iron used in the process of making cement. Essentially, operators must submit a plan and the plan must be approved before mining commences.

The Montana State Code of 1985 describes the laws governing surface mines extracting coal and uranium (in Part 2), metallic ores (in Part 3), and bentonite, clay, scoria, phosphate, rock and gravel (in Part 4).

In Minnesota, metallic mineral mines are governed by Minnesota State Law 1969 C. 774-1, which was amended in 1983, C. 270-1 to 4, to address the reclamation of land subjected to the mining of metallic minerals and peat. The Minnesota Department of Natural Resources has adopted rules for the reclamation of iron ore and taconite mines and for nonferrous metal mines. Local governments can, in Minnesota, develop zoning and permitting processes that require bonding and evidence of reclamation success.

7.4.5. Australia

As in North America and elsewhere, mining legislation in Australia is applied at the level of individual states. Several states have quite detailed requirements on tailings dams. The principal points covered by Queensland legislation are described as guidelines in 'Dam Safety Guidelines on Tailings Management' 1994 (see References).

7.5. CONCLUDING REMARKS

This chapter has attempted to provide an illustration of the types of regulations which may be applicable to tailings disposal based primarily on the example of the United Kingdom and with some brief examples from other countries to highlight different aspects. The relevant aspects may be covered in general legislation with little if any specific mention of tailings disposal or, more commonly, in legislation relating to the control of mineral extraction and, particularly to the restoration of mineral workings. The review of countries other than the United Kingdom has concentrated on these aspects.

Dans la plupart des pays, il y a une certaine communauté d'approche : la législation requiert une étude environnementale avant le début des travaux miniers ou autres activités comportant des dépôts de stériles. Deux formes de procédure peuvent se présenter : une procédure légale d'étude environnementale, ou une procédure moins officielle relevant des dispositions du plan d'utilisation du sol. Cela implique presque toujours la soumission et l'approbation d'un plan englobant l'extraction du minerai, les activités associées, telles que la mise en dépôt des stériles, et la restauration finale lors de l'achèvement des travaux miniers. La principale différence entre le Royaume-Uni et les autres pays est que plusieurs pays ont inclut des pouvoirs pour exiger des exploitants qu'ils présentent des cautions ou garanties financières assurant que la restauration sera exécutée suivant le plan soumis et approuvé.

Des approches complémentaires, présentant aussi une communauté d'intention si ce n'est de détails, incluent des prescriptions relatives à la protection de l'environnement, par exemple, normes de qualité de l'eau, à la protection des personnes sur leurs lieux de travail et à la sécurité publique.

La responsabilité de l'application des règlements varie d'un pays à l'autre. Elle peut incomber aux autorités nationales, régionales ou locales, et est généralement précisée dans la législation.

In most countries there is some commonality of approach in that the legislation includes environmental assessment prior to the commencement of mining or other activities involving tailings disposal. This may be via a formal environmental assessment procedure or more informally through the land-use planning system. This almost invariably involves the submission and approval of a plan covering the mineral extraction, associated activities, such as tailings disposal, and final restoration on the completion of mining. The main difference between the UK and other countries is that many countries have included powers to require operators to submit bonds or financial guarantees to ensure that restoration is completed according to the submitted and approved plan.

Complementary approaches, which are also common in their intention if not in the details, include the requirements for environmental protection, e.g. through water quality standards, and for the protection of people at work and the general public.

The responsibility for policing and enforcing the regulations varies from country to country. It may be at national, regional or local authority level and is usually specified in the legislation.

8. RÉFÉRENCES/REFERENCES

- Abadjiev C.B.(1985a) Estimation of the physical characteristics of deposited tailings in the tailings dam of nonferrous metallurgy. Proc. 11th Int. Conf. SM & FE, San Francisco, vol 3 pp 1231-1234.
- Abadjiev C.B.(1985b) Improved upstream construction of tailings dams. Proc. 11th Int. Conf. SM & FE, San Francisco, vol 3 pp 1235-1236.
- Bengson A. (1978) Irrigation techniques for tailings revegetation in the arid South West. Proc. 2nd. Int. Conf. Tailings Disposal, Denver, vol 2, pp 487-504.
- Bishop A.W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, vol 5, no 1 pp 7-22.
- Blight G.E. (1969) Shear stability of dumps and dams of gold mining waste. Trans South African Instn. Civ. Engrs. vol 11 no 3.
- Blight G.E. (1987) The concept of the master profile for tailings dam beaches. Proc. Int. Symp. Prediction and Performance in Geotechnical Engineering. Balkema Press. pp 361-365.
- Casagrande L. and McIver B.N. (1970) Design and construction of tailings dams. Symp. Stability of Open Pit Mining, Vancouver.
- Castro G. (1969) Liquefaction of sands. Harvard Soil Mechanics Series No 81. Harvard University, Cambridge, Mass.
- Clayton C.I., Simons N.E. and Matthews M.C. (1982) Site Investigation. Granada Publishing. 424 pps
- Day A.D. (1978) Disturbed land reclamation in an arid environment. Proc. 2nd. Int. Conf. Tailings Disposal, Denver, vol 2, pp 437-460.
- Donald I. and Giam P.(1989) Soil slope stability programs review. The Association for Computer Aided Design Limited, Australia, Publication No U.255.
- Dunncliff J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons, 577 pps.
- Fellenius W. (1926) Jordstatiska beräkningar med friktion och kohesion för cirkulär cylindriska glidytor. Kungl. Väg- och Vattenbyggnadskårens 75-årsskrift, pp 79-127, Stockholm. (Earth statical calculations with friction and cohesion for circular cylindrical sliding surfaces).
- Fellenius W. (1936) Calculation of the stability of earth dams. Trans. 2nd Int. Congress on Large Dams, Washington. Vol 4 pp 445-462.
- Filion M.P. (1984) Decommissioning and rehabilitation of Beaver Lodge tailings - environmental and radiological concerns. Proc. 6th. Symp. Uranium Mill Tailings Management, Colorado, pp 349-358.

- Finn W.D.L.(1982) Fundamental aspects of response of tailings dams to earthquakes. ASCE Geotech. Engrng. Div. Session on Stability of Tailings Dams, New Orleans.
- Finn W.D.L., Lee K.W., Maartman C.H. and Lo R.C.Y (1978) Cyclic pore pressure under anisotropic conditions. Proc. ASCE Geotech. Engrg. Div. Specialty Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Calif. Vol 1, pp 457-470.
- Floods and Reservoir Safety (1978) The Institution of Civil Engineers Report, London. 58pps.
- Fookes P.G., Dale S.G. and Land J.M. (1991) Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area. Q. Jn. Eng. Geol., vol 24, no 3, pp 249-265.
- Garga V.K., Smith H.R. and Scharer J.M. (1983) Abandonment of acid generating mine tailings. Proc. 7th. Pan American Conf. SM&FE, vol 2, pp 613-626.
- Grigg R.F. and Lo R.C.Y. (1979) Simplified seismic stability analysis. Program Documentation, Preprint No 3746, ASCE Convention, Atlanta, Georgia.
- Hasegawa H.S., Basham P.W. and Berry M.J. (1981) Attenuation relations for strong seismic ground motion in Canada. Bull. Seis. Soc. Am. Vol 71, no 6, pp 1943-1962.
- ICOLD Bulletin No 72.(1989) Selecting Seismic Parameters for Large Dams - Guidelines. Int. Commission on Large Dams, Paris/CIGB Bulletin n° 72 (1989) Choix des paramètres sismiques pour grands barrages - Recommandations. CIGB, Paris.
- Janbu N.(1973) Slope stability computations. Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume. John Wiley. pp 18-24.
- Jennings J.E. (1979) The failure of a slimes dam at Bafokeng -Mechanisms of failure and associated design considerations. The Civil Engineer in South Africa, vol 21, no 6, pp 135-141.
- Klohn E.J.(1984) The Brenda Mine's cycloned sand tailings dam. Proc. Int. Conf. Case Histories in Geotechnical Engineering. U. Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, Vol 2, pp 953-977.
- Klohn E.J., Maartman C.H., Lo R.C.Y. and Liam Finn (1978) Simplified seismic analysis for tailings dams. Proc. ASCE Geotech. Engrng. Div. Specialty Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Calif. Vol 1, pp 540-556.
- Klohn E.J., Garga V.K. and Shukin W. (1981) Densification of sand tailings by blasting. Proc. 10th ICSM&FE, Stockholm, vol 3, pp 725-730.
- Ladd C.C. (1991) Stability evaluation during staged construction. 22nd Terzaghi Lecture. ACSE Jn. Geotech. Engrg. vol 117, no 4, pp 540-615.
- Little A.L. and Price V.E. (1958) The use of an electronic computer for slope stability analysis. Geotechnique, vol 8, no 3, pp 113-120.

- Martin P.L., Vaciago G, Somers N.R. and Burbridge H.T. (1994) Additional lagooning on Stage 1 of the Gale Common Ash Disposal Scheme: Investigation, design and preparatory works. Proc. 1st Int. Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canada, pp 325-330.
- Mitchell J.K. (1981) Soil improvement - state of the art report. Proc. 10th ICSM&FE, Stockholm, vol 4, pp 509-565.
- Morrison W. and Simmons L. (1977) Chemical and Vegetative Stabilization of Soils. USBR Report No REC-ERC-76-13.
- Oliphant J. and Horne R.M. (1992) A comparative review of commercially-available software for soil slope stability analysis. Geotechnical and Geological Engineering, vol 10, no 4, pp 321-344.
- Penman A.D.M. (1953) Shear characteristics of a saturated silt measured in triaxial compression. Geotechnique, vol 3, no 8, pp 312-328.
- Potts D.M., Dounias G.T. and Vaughan P.R. (1990) Finite element analysis of progressive failure of Carsington Dam. Geotechnique, vol 40, no 1 pp 79-101.
- Queensland Government (1994) Dam Safety Guidelines on Tailings Management. Dept. Primary Industries. Water Resources, 18th October 1994.
- Seed H.B. (1979) Considerations in the earthquake resistant design of earth and rockfill dams. 19th Rankine Lecture, Geotechnique, vol 29, no3, pp 215-263.
- Seed H.B. and Idriss I.M. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. EEC Report No 70-10, Earthquake Engineering Research Centre, U. of California, Berkeley.
- Vick S.G.(1983) Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley and Sons. 369pps.
- Ward T.A. (1985) Rehabilitation programme for the Mary Kathleen Uranium Mine. Proc. 7th. Symp. Uranium Mill Tailings Management, Colorado, pp 579-589.

ANNEXES/APPENDICES

Annexe A - Stabilité

Appendix A - Stability

Annexe B - Glossaire

Appendix B - Glossary

STABILITÉ

En ce qui concerne les glissements du type rotationnel, la stabilité d'un barrage de stériles peut être étudiée à partir de calculs de stabilité « non circulaire ». Fellenius (1926, 1936) a déterminé les forces normales et de cisaillement agissant sur une surface de glissement de forme circulaire, en considérant une coupe transversale du glissement potentiel et en divisant la zone située au-dessus de la ligne de glissement en plusieurs tranches verticales. Le poids de chaque tranche est décomposé en deux forces, l'une normale, l'autre tangente à la ligne de glissement. La somme des forces tangentielles donne la force active de mouvement. La force résistant au mouvement est calculée à partir, soit de la résistance au cisaillement, non drainée, in situ, du sol (généralement adoptée pour les argiles), soit de la résistance au cisaillement exprimée en termes de contraintes effectives, $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$. Le rapport force résistant au mouvement/force active de mouvement donne le coefficient de sécurité. Lorsque ce rapport tombe à la valeur 1, un glissement se produit.

Le calcul en contraintes effectives (effective stress analysis - ESA) permet de tenir compte des pressions interstitielles. Cette méthode a été développée par Bishop (1955) pour des glissements circulaires, et programmée pour calcul sur ordinateur par Little et Price (1958). La méthode fut ultérieurement développée pour une application à des surfaces de glissement de forme générale (pas uniquement circulaire), par Morgenstern et Price (1965), Janbu (1973) et autres. De nombreux logiciels de calcul de stabilité des talus sont actuellement disponibles sur le marché. Une étude comparative des logiciels disponibles sur le marché a été réalisée par Oliphant et Horne (1992).

L'application du calcul en contraintes effectives (ESA) à un barrage de stériles peut être décomposée suivant les étapes ci-après :

1. Déterminer, à partir d'essais en laboratoire, les valeurs représentatives de c' et ϕ' pour le remblai devant servir à la construction du barrage. On préparera des échantillons compactés, à des teneurs en eau et des densités correspondant à celles prévues au cours de la construction. Les essais sur échantillons couvriront un domaine de conditions s'étendant entre les valeurs maximales et minimales prévues.
2. Estimer les pressions interstitielles qui existeront dans la zone susceptible d'être traversée par une surface de glissement (voir paragraphe 3.9.3.).
3. Concevoir un talus aval stable à l'aide d'un programme de calcul adéquat. Les conditions les plus sévères seront prises comme hypothèses et la surface de glissement présentant le plus faible coefficient de sécurité sera définie. Le projet

STABILITY

The stability of a tailings dam in relation to rotational type slips can be assessed from generalised non-circular stability analyses. Fellenius (1926,1936) determined the normal and shear forces acting on a circular slip surface by considering a section through the potential slip, and dividing the area above the slip surface into several vertical slices. The weight of each slice is resolved normal and parallel to the slip surface. The sum of the forces along the surface gives the disturbing force. The restoring force is then calculated from either the in situ undrained shear strength of the soil (usually used for clays) or the shear strength in terms of effective stresses, $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$. The ratio of restoring/disturbing forces gives the factor of safety: when this falls to unity, a slip can occur.

The effective stress analysis (ESA) enables an allowance to be made for pore pressures and this method has been developed by Bishop (1955) for circular slips and programmed for computer by Little and Price (1958). The method was further developed for slip surfaces of general shape (not just circular) by Morgenstern and Price (1965), Janbu (1973) and others. Numerous slope stability programmes have been written for computers and are available commercially. A comparative review of commercially available software for slope stability analysis has been made by Oliphant and Horne (1992).

The steps used by the designer for making an ESA for a tailings dam can be as follows:

1. Determine representative values of c' and ϕ' for the fill that is to be used for construction from laboratory tests. Recompact samples have to be prepared at water contents and densities that are expected to be achieved during construction. Usually tests are made on samples covering a range of conditions so that maximum and minimum expected values are ascertained.
2. Assess pore pressures that will act in the region through which a slip surface may develop. This is discussed in 3.9.3.
3. Design a stable downstream slope with the aid of a suitable computer programme. Worst conditions must be assumed and the slip surface determined that gives the lowest factor of safety. Potential dam and existing foundation conditions,

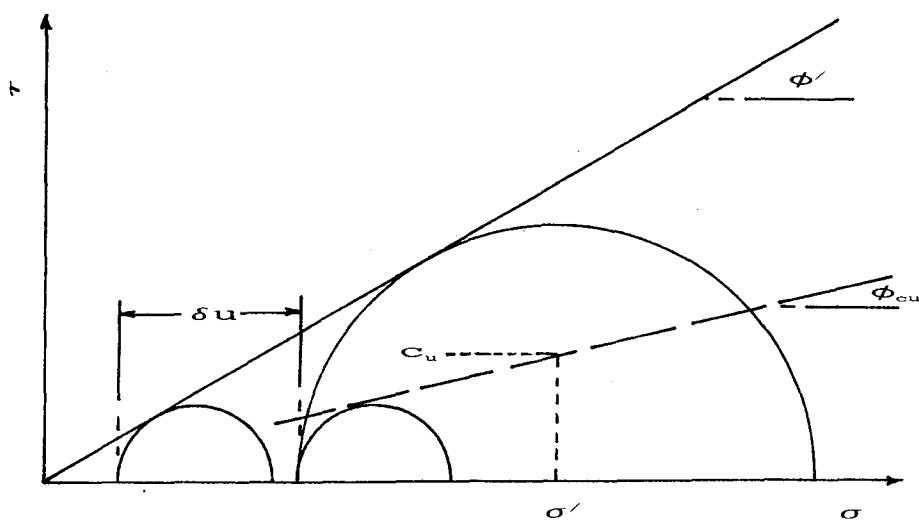
de barrage et les conditions de fondation existantes, telles qu'elles ont été déterminées à partir des reconnaissances du site, seront étudiés ensemble : une surface de glissement défavorable peut pénétrer profondément dans une fondation molle.

Dans le cas de matériaux présentant une expansion lors du cisaillement, les déformations sur la surface de glissement potentiel tendront à réduire les pressions interstitielles, améliorant ainsi la stabilité ; mais étant donné que cette conditions ne se manifeste que lorsque la rupture est imminente, on ne peut l'adopter dans le projet. Par contre, dans le cas de matériaux présentant une contractance lors du cisaillement, il y a augmentation de la pression interstitielle, ce qui réduit la stabilité ; cette situation sera prise en considération lors de la conception de l'ouvrage.

On pourrait avancer que la résistance au cisaillement sur une surface de glissement potentiel, correspondant aux contraintes normales effectives dues au poids des matériaux sus-jacents, pourrait être utilisée dans le calcul de stabilité, si le coefficient de sécurité était suffisamment élevé pour qu'en aucun point de la surface de glissement il n'y ait de déformation susceptible d'augmenter la pression interstitielle dans ce type de matériau. Pour une meilleure sécurité, deux approches sont possibles :

Calcul type « a » : ESA (calcul en contraintes effectives)

On utilise les résultats des essais consolidés, non drainés (CU), pour construire les cercles de Mohr (Fig. A.1.) et obtenir une valeur pour ϕ_{cu} . On adopte cette valeur dans le calcul de stabilité où il est admis que la pression interstitielle de l'essai CU a le même effet de réduction de la résistance au cisaillement que la pression interstitielle induite par les déformations sur la surface de glissement.



as determined by the site investigation, must be considered together: a worst surface may pass deep into a soft foundation.

With material that dilates on shearing, strains on the potential slip surface will tend to reduce pore pressures, thereby improving stability, but since this condition does not develop until failure is imminent, it cannot be used in design. On the other hand, materials that contract on shearing cause increase of pore pressure, which reduces stability and must be considered in design.

It might be argued that the shear strength on a potential slip surface corresponding to the effective normal stress produced by the weight of the overlying material, could be used in the stability analysis, if the factor of safety was kept so high that there would be no strain developed along any part of the surface to cause increase of pore pressure in this type of material. In preference and as a safer method, two approaches are used:

Type “a” Analysis (ESA) (effective stress analysis)

The results of consolidated-undrained (CU) tests are used to construct Mohr envelopes, as shown by Fig. A.1, to obtain a value for ϕ_{cu} . This value is used in the stability analysis where it is assumed that the development of pore pressure in the CU test will have the same influence in reducing the potential shear strength as the pore pressure developed by strains on the slip surface. To improve accuracy, the

Fig. A.1.

Shear strength shown by Mohr's diagram
Résistance au cisaillement représentée sur le diagramme de Mohr

Pour une meilleure précision, on peut appliquer aux échantillons destinés aux essais triaxiaux une consolidation anisotrope sous condition K_0 , plutôt qu'une simple consolidation isotrope (pression égale tout autour de la cellule), ce qui reproduit plus correctement la consolidation des boues in situ.

Calcul type « b » : USA (calcul en contraintes non drainées)

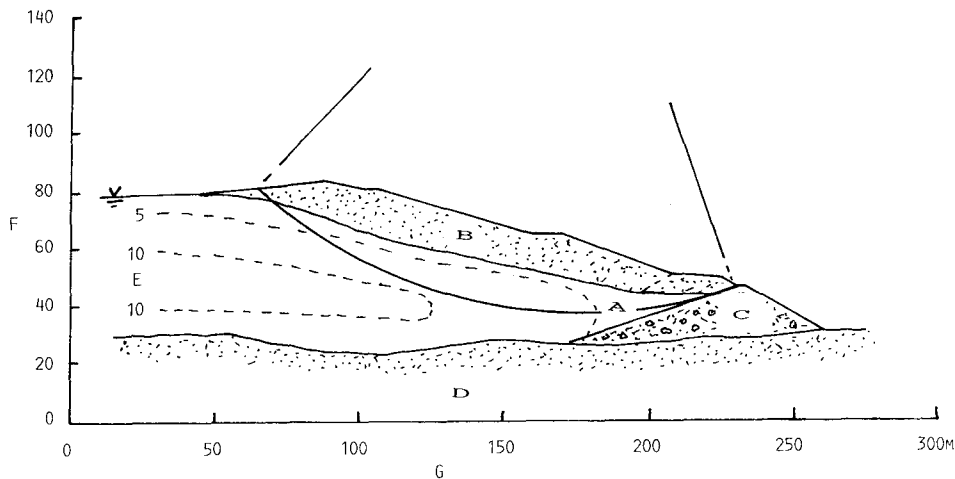
La valeur de la résistance au cisaillement non drainée, obtenue à partir des essais CU ou CK_0U (c_u), peut s'exprimer sous la forme d'une fraction de la contrainte de consolidation (σ_c'), de sorte que, dans le calcul de stabilité, une valeur adéquate de c_u peut être attribuée à la base de chaque tranche de la surface de glissement ; c'est-à-dire que le rapport c_u/σ_c' est utilisé dans un calcul $\phi = 0$.

Ces concepts ont été discutés par Vick (1983).

Ladd (1991) signale que le calcul type « b » donne un coefficient de sécurité inférieur à celui obtenu dans le calcul ESA, pour la même surface de glissement et les mêmes pressions interstitielles avant rupture.

Il donne comme exemple un barrage de stériles construit par la méthode amont (Fig. A.2.). Un barrage voisin, de géométrie identique, mais dont le remblai a été exécuté plus rapidement, s'est rompu au cours de l'année précédente. Lors des reconnaissances effectuées sur ce barrage lorsqu'il avait 55 m de hauteur, deux sondages au scissomètre Nilcon et trois sondages avec carottier à piston Osterberg pour les prises d'échantillons non remaniés furent exécutés. Des piézomètres et cellules piézométriques supplémentaires mesuraient les pressions interstitielles existantes. On effectua des essais triaxiaux et autres essais pour obtenir ϕ' et le rapport c_u/σ_c' . Ce rapport fut aussi mesuré in situ par des essais au scissomètre. Le calcul ESA donna un coefficient de sécurité de 2,4 + ou - 0,4, alors que le calcul USA donna un coefficient de sécurité de 1,25 + ou - 0,1, valeur plus acceptable compte tenu de la rupture du barrage voisin identique.

Il faut noter que dans ce barrage (Fig. A.2.) on laissa des boues s'accumuler sur le remblai d'amorce, au cours de la construction, ce qui permettait ainsi à une



triaxial samples may be consolidated anisotropically under K_0 conditions, rather than simply isotropically (equal all round cell pressure) more correctly to simulate the field consolidation of slimes.

Type “b” Analysis (USA) (undrained stress analysis)

The value of undrained shear strength obtained from CU or CK_0U tests (c_u) can be expressed as a fraction of the consolidation stress (σ_c'), so that in the stability analysis an appropriate value of c_u can be allocated to the slip surface at the base of each slice, i.e. the c_u/σ_c' ratio is used in a $\phi = 0$ analysis.

These concepts have been discussed by Vick (1983).

Ladd (1991) points out that the “b” type analysis gives a lower factor of safety than an ESA for the same slip surface and pre-failure pore pressures.

He gives as an example, a tailings dam built by the upstream method, as shown by Fig. A.2. A nearby dam of similar geometry, but filled more rapidly, had failed during the previous year. In the investigation of this dam, made when it was 55m high, two Nilcon field vane soundings and three borings with Osterberg fixed piston samplers to obtain undisturbed samples were used. Additional piezometers and piezometer probes measured existing pore pressures. Triaxial and other tests were employed to obtain both ϕ' and the ratio c_u/σ' . The latter ratio was also measured by in situ field vane tests. The ESA gave a factor of safety = 2.4 ± 0.4 , whereas the USA gave $FS = 1.25 \pm 0.1$: a value more acceptable in view of the failure of the similar, nearby dam.

It will be noted that in this dam (see Fig.A.2) slimes had been allowed to accumulate over the starter dam during construction, thereby providing a path for

Fig. A.2.

Stability of tailings dam built by upstream method

Stabilité d'un barrage de stériles construit par la méthode amont

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| (A) Slimes | (A) Boues de stériles |
| (B) Coarse tailings | (B) Stériles grossiers |
| (C) Starter dam | (C) Remblai d'amorce |
| (D) Sand and gravel foundation | (D) Fondation de sable et gravier |
| (E) Pressure head (m) | (E) Charge piézométrique (m) |
| (F) Height (m) | (F) Hauteur (m) |
| (G) Distance (m) | (G) Distance (m) |

surface de glissement de se développer presque totalement dans les boues. Une méthode de construction empêchant un tel phénomène de se produire est décrite au chapitre 4.4.

Ladd a donné deux autres exemples, concernant des remblais en cours de construction sur des fondations argileuses relativement molles et sensibles, où les rapports des coefficients de sécurité déduits des calculs ESA et USA étaient respectivement de 1,9 et 2,35. Dans le cas du barrage de stériles, le rapport était de $2,4/1,25 = 1,9$.

Ces exemples montrent que dans le cas de matériaux où des pressions interstitielles positives se développent au cours du cisaillement, il convient d'évaluer la sécurité au glissement, en utilisant les techniques USA.

a slip surface almost totally in slimes. A method of construction to prevent this is described in Section 4.4.

Ladd gave two other examples, involving embankments under construction on medium soft and sensitive clay foundations, in which the ratios of the factors of safety found by ESA and USA were respectively, 1.9 and 2.35. In the case of the tailings dam, the ratio was $2.4/1.25 = 1.9$.

These examples show that with materials that develop positive pore pressures during shearing, used as fill or forming the foundation, it may be appropriate to assess safety against slip failure by use of USA techniques.

GLOSSAIRE

En général, les glossaires contenus dans le Bulletin n° 45 (1982) « Manuel des Barrages et Dépôts de Stériles » et le Bulletin n° 74 « Sécurité des Barrages de Stériles - Recommandations » s'appliquent au présent Bulletin et n'y seront donc pas reproduits. Seuls les quatre termes suivants ont été définis :

Longueur de la plage - Distance parallèle à la crête du barrage, mesurée le long de la plage.

Largeur de la plage - Distance entre la crête du barrage et la retenue de liquide surnageant.

Longueur de la retenue de stockage des stériles - Distance mesurée à l'amont, entre le barrage et l'extrémité des stériles stockés.

Retenue - Zone de liquide surnageant dans le réservoir de stockage des stériles, entourant généralement l'ouvrage de décantation ou la barge de pompage.

GLOSSARY

In general, the glossaries given in Bulletin No.45 (1982) 'Manual on Tailings Dams and Dumps', and Bulletin No.74 (1989) 'Tailings Dam Safety: Guidelines' apply to this Bulletin, and will not be repeated. The following few terms are given for further clarification:

Beach length. Distance parallel to the dam crest, measured along the beach.

Beach width. Distance from dam crest to the pool of supernatant liquid.

Length of impoundment. Distance measured upstream from the dam to the end of the stored tailings.

Pool or pond. Area of supernatant liquid in the impoundment, usually surrounding the decant arrangement or pump barge.

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIE ET ENVIRONNEMENT

HISTORIQUE

Le centre Industrie et Environnement du PNUE (PNUE IE) a été créé à Paris en 1975, dans le but de faire collaborer industriels et gouvernements pour la promotion d'un développement industriel respectueux de l'environnement. Ses objectifs sont :

- 1) d'encourager l'intégration de critères environnementaux dans les plans de développement industriel ;
- 2) de faciliter l'élaboration et l'application de procédures et de principes directeurs destinés à protéger l'environnement ;
- 3) de promouvoir l'emploi de technologies « propres » et sans dangers ;
- 4) de stimuler les échanges d'informations et d'expériences dans le monde entier.

Le PNUE IE diffuse des informations d'ordre pratique. Il développe la coopération sur le terrain et favorise les échanges d'informations. Ces actions font l'objet d'évaluations régulières et d'un suivi permanent. Pour promouvoir le transfert d'informations, le PNUE IE a mis au point trois outils complémentaires : **les rapports techniques, la revue « Industry and Environment », et un service de renseignements techniques.**

Dans un souci de coopération technique, le PNUE IE favorise les transferts de technologies et contribue à la mise en œuvre de pratiques destinées à préserver l'environnement, en encourageant les interactions et les échanges, en développant des activités de sensibilisation et de formation, et en réalisant des études de diagnostic.

ABOUT UNEP INDUSTRY AND ENVIRONMENT CENTRE

The Industry and Environment centre was established by UNEP in 1975 to bring industry and government together to promote environmentally sound industrial development. UNEP IE is located in Paris and its goals are to:

- 1) Encourage the incorporation of environmental criteria in industrial development plans;
- 2) Facilitate the implementation of procedures and principles for the protection of the environment;
- 3) Promote the use of safe and clean technologies;
- 4) Stimulate the exchange of information and experience throughout the world.

UNEP IE provides access to practical information and develops co-operative on-site action and information exchange backed by regular follow-up and assessment. To promote the transfer of information and the sharing of knowledge and experience, UNEP IE has developed three complementary tools: technical reviews and guidelines; *Industry and Environment* - a quarterly review; and a technical query-response service.

In keeping with its emphasis on technical co-operation, UNEP IE facilitates technology transfer and the implementation of practices to safeguard the environment through promoting awareness and interaction, training and diagnostic studies.

Imprimerie Louis-Jean
05003 Gap
Dépôt légal : Novembre 1996
N° 790
ISSN 0534-8293
ISBN 92-807-1590-7

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>