

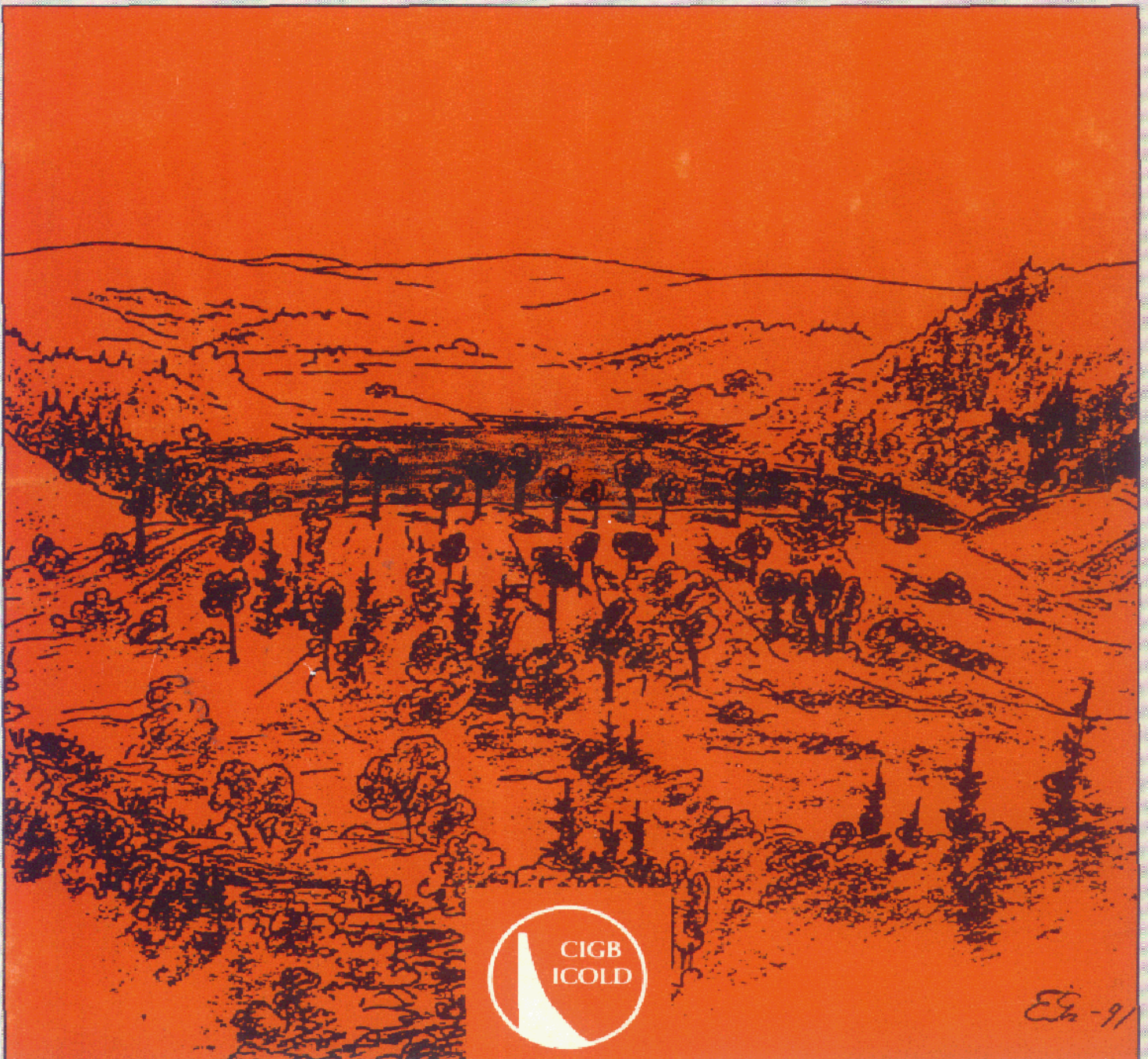
TAILINGS DAMS AND ENVIRONMENT

Review and Recommendations

BARRAGES DE STERILES ET ENVIRONNEMENT

Synthèse et Recommandations

Bulletin 103



1996

The cover illustration reproduces a picture drawn by Elisabeth Geijer (Sweden).
By courtesy of the author.

*L'illustration de couverture reproduit un dessin exécuté par Elisabeth Geijer (Suède).
Avec l'aimable autorisation de l'auteur.*

Original text in English
French translation by J.-M. Dupas (France)

*Texte original en anglais
Traduction en français par J.-M. Dupas (France)*

TAILINGS DAMS AND ENVIRONMENT

Review and Recommendations

BARRAGES DE STERILES ET ENVIRONNEMENT

Synthèse et Recommandations

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

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

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

(2) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(3) Member since 1993/Membre depuis 1993.

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

(5) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(6) Member until 1991/Membre jusqu'en 1991.

(7) Member since 1991/Membre depuis 1991.

SOMMAIRE

CONTENTS

AVANT-PROPOS	FOREWORD
1. INTRODUCTION	1. INTRODUCTION
2. ASPECTS RELATIFS À L'ENVIRONNEMENT	2. ENVIRONMENTAL ASPECTS
3. CARACTÉRISTIQUES DES STÉRILES	3. TAILINGS CHARACTERISTICS
4. LES DIVERSES PHASES DES BARRAGES DE STÉRILES	4. PHASES OF TAILINGS DAM
5. RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT PENDANT L'EXPLOITATION ET LA RÉHABILITATION	5. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING OPERATING AND REHABILITATION PHASES
6. STABILITÉ À LONG TERME VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT	6. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING THE LONG-TERM PHASE
7. EFFETS NÉFASTES DES PRODUITS CHIMIQUES RÉSIDUELS, DE L'ALTÉRATION ET DE LA RADIOACTIVITÉ SUR L'ENVIRONNEMENT	7. ENVIRONMENTAL EFFECTS OF REMNANT PROCESS CHEMICALS, WEATHERING AND RADIOACTIVITY
8. OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES ET ENVIRONNEMENT	8. TAILINGS DAM DECANT FACILITIES IN THE ENVIRONMENTAL CONTEXT
9. AUSCULTATION PENDANT L'EXPLOITATION	9. MONITORING OF OPERATIONS
10. RÉHABILITATION DE LA SURFACE DES STÉRILES VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT	10. ENVIRONMENTAL REHABILITATION OF TAILINGS SURFACES
11. BIBLIOGRAPHIE	11. BIBLIOGRAPHY

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. INTRODUCTION	14
2. ASPECTS RELATIFS À L'ENVIRONNEMENT	18
2.1. Impact sur la qualité des eaux de surface	18
2.2. Impact sur la qualité des nappes souterraines	20
2.3. Impact sur la qualité de l'air	20
2.4. Réhabilitation et revégétalisation des barrages de stériles	22
2.5. Autres impacts sur l'environnement	22
3. CARACTÉRISTIQUES DES STÉRILES	24
4. LES DIVERSES PHASES DES BARRAGES DE STÉRILES	26
5. RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT PENDANT L'EXPLOITATION ET LA RÉHABILITATION	32
5.1. Généralités	32
5.2. Bilan hydraulique	32
5.3. Sécurité à long terme	34
5.3.1. Généralités	34
5.3.2. Stabilité des talus	36
5.3.3. Événements extrêmes	36
5.4. Effets d'une dégradation lente	38
5.4.1. Érosion interne due à l'eau	38
5.4.2. Érosion externe et envasement	40
5.4.3. Érosion par le vent	44
5.4.4. Effets du gel et de la glace	44
5.4.5. Altération	44
5.4.6. Dégradations dues à l'activité humaine	46
5.4.7. Variations climatiques et altération des sols de surface	46
5.5. Stabilité au cisaillement	46
6. STABILITÉ À LONG TERME VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT	52
6.1. Introduction	52
6.2. Dépôts sous l'eau	52
6.3. Dépôts mis hors d'eau	56

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	11
1. INTRODUCTION	15
2. ENVIRONMENTAL ASPECTS	19
2.1. Impact on surface water quality	19
2.2. Impact on groundwater quality	21
2.3. Impact on air quality	21
2.4. Rehabilitation and re-vegetation of closed tailings dams	23
2.5. Other environmental impacts	23
3. TAILINGS CHARACTERISTICS	25
4. PHASES OF TAILINGS DAMS	27
5. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING OPERATING AND REHABILITATION PHASES	33
5.1. General	33
5.2. Water balance	33
5.3. Long-term safety	35
5.3.1. General	35
5.3.2. Slope stability	37
5.3.3. Extreme events	37
5.4. Slow deteriorative actions	39
5.4.1. Internal erosion by water	39
5.4.2. External erosion and siltation by water	41
5.4.3. Wind erosion	45
5.4.4. Effects of frost and ice	45
5.4.5. Weathering	45
5.4.6. Anthropogenic damage	47
5.4.7. Climate variability and substrata deterioration	47
5.5. Shear stability	47
6. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING THE LONG-TERM PHASE ...	53
6.1. Introduction	53
6.2. Under water deposits	53
6.3. Dewatered deposits	57

7. EFFETS NÉFASTES DES PRODUITS CHIMIQUES RÉSIDUELS, DE L'ALTÉRATION ET DE LA RADIOACTIVITÉ SUR L'ENVIRONNEMENT	60
7.1. Radioactivité	62
7.2. Cyanure résiduel	64
7.3. Formation de produits acides et de sels	64
7.4. Contrôle de la formation de produits acides	66
8. OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES ET ENVIRONNEMENT	74
8.1. Au cours de l'exploitation	74
8.2. Après la fermeture de l'exploitation	74
9. AUSCULTATION PENDANT L'EXPLOITATION	78
9.1. Généralités	78
9.2. Stabilité et sécurité	78
9.3. Surveillance des nappes souterraines et des eaux de surface	80
9.4. Érosion et dispersion des stériles solides	82
9.5. Auscultation sur le plan de la sécurité, de la stabilité et du respect de l'environnement	86
9.5.1. Lignes de percolation	86
9.5.2. Profil de résistance	86
9.5.3. Défauts et déformations visibles	88
9.5.4. Relevés topographiques	88
9.5.5. Mesures du débit de percolation	90
9.5.6. Revanche	90
9.5.7. Surveillance par satellite	90
10. RÉHABILITATION DE LA SURFACE DES STÉRILES VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT	92
10.1. Contrôle de l'eau	92
10.2. Prévention de la pollution de l'air	94
10.3. Végétalisation	96
10.3.1. Végétalisation des talus du dépôt de stériles	96
10.3.2. Végétalisation de la surface des dépôts de stériles	98
10.3.3. Le mélange de graines	100
10.3.4. En surface du dépôt	100
10.3.5. Sur les talus du dépôt	100
11. BIBLIOGRAPHIE	102

7. ENVIRONMENTAL EFFECTS OF REMNANT PROCESS CHEMICALS, WEATHERING AND RADIOACTIVITY	61
7.1. Radioactivity	63
7.2. Remnant cyanide	65
7.3. Formation of acid and salts	65
7.4. Control of acid formation	67
8. TAILINGS DAM DECANT FACILITIES IN THE ENVIRONMENT CONTEXT	75
8.1. Operational phase	75
8.2. Post closure phase	75
9. MONITORING OF OPERATIONS	79
9.1. General	79
9.2. Stability and safety	79
9.3. Monitoring of ground and surface water	81
9.4. Erosion and dispersion of tailings solids	83
9.5. Monitoring for safety, stability and environmental integrity	87
9.5.1. Seepage surface	87
9.5.2. Strength profile	87
9.5.3. Visible defects and deformations	89
9.5.4. Survey measurements	89
9.5.5. Seepage flow measurements	91
9.5.6. Freeboard	91
9.5.7. Satellite surveillance	91
10. ENVIRONMENTAL REHABILITATION OF TAILINGS SURFACES	93
10.1. Water control	93
10.2. Prevention of air pollution	95
10.3. Establishment of vegetation	97
10.3.1. Establishing vegetation on the outer slopes of a tailings deposit .	97
10.3.2. Establishing vegetation on the top surfaces of tailings deposits ...	99
10.3.3. The seed mix	101
10.3.4. On the top of the deposit	101
10.3.5. On the side of the deposit	101
11. BIBLIOGRAPHY	102

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1. – Niveaux des rejets d'un barrage de stériles en fonction du temps.
- Fig. 2. – Barrages pour dépôts sous l'eau.
- Fig. 3. – Barrages types pour dépôts mis hors d'eau.
- Fig. 4. – Couverture à couches multiples empêchant la formation de produits acides dans des stériles contenant de la pyrite (d'après Aubertin et Chapuis, 1991).
- Fig. 5. – Profils donnant le pourcentage de sulfure, la conductivité et le pH sous la surface des stériles d'un barrage abandonné depuis 40 ans.
- Fig. 6. – Effets de la longueur et de la pente des talus sur le degré d'érosion des talus des barrages de stériles.
- Fig. 7. – Représentation schématique du contrôle de l'eau de surface au moyen de diguettes de crête et de séparation.

LIST OF FIGURES

- Fig. 1. – Release levels from a tailings dam with time.
- Fig. 2. – Dams for under water deposits.
- Fig. 3. – Typical dams for dewatered deposits.
- Fig. 4. – Multilayer cover system to prevent acid generation in pyritic tailings (after Aubertin and Chapuis, 1991).
- Fig. 5. – Profiles of sulphide of sulphur, conductivity and pH for near surface tailings from dam abandoned 40 years ago.
- Fig. 6. – Effects of slope length and slope angle on rates of erosion from the outer slopes of tailings dams.
- Fig. 7. – Principle of surface water control by crest and dividing walls.

AVANT-PROPOS

A travers les siècles, l'activité minière a détruit des régions, généralement dans des sites peu visibles, sans que la classe dirigeante en ait pris conscience. Pour augmenter les profits, les dépenses concernant les dépôts de stériles ont été restreintes au minimum, attitude accentuée au nom d'un meilleur rendement, du marché et de la compétition intense. L'accumulation d'immenses tas de déchets, mis en place sans compactage suivant la pente naturelle des matériaux, a été autorisée, toujours plus près des camps de mineurs qui sont devenus des villages et des villes. Les moyens modernes de communication permettent à chacun d'être au courant de ce qui se passe à n'importe quel endroit du monde. La rupture du crassier Aberfan en 1966, qui a englouti une école et des maisons faisant 144 victimes dont 116 enfants, a bouleversé le monde.

Les réglementations gouvernementales, prises pour nettoyer nos rivières, empêchent les entreprises minières d'y rejeter leurs eaux sales. Quelques mines de charbon ont construit des digues en résidus grossiers en travers de cours d'eau afin de filtrer et retenir les fines particules noires issues de leurs eaux de lavage, commençant ainsi la création de bassins de stockage de matériaux fins. Lorsque le premier était plein, un autre était construit juste en amont. La rupture en cascade de trois bassins de ce type, non contrôlés, a répandu de larges quantités de boue collante dans Buffalo Creek en 1972, causant la mort de 125 personnes et des dégâts considérables. D'un certain point de vue, ce désastre a permis, dans le pays, d'améliorer les conditions d'exploitation.

De telles tragédies ont accéléré la mise en place de réglementations gouvernementales et ont accru le désir de restaurer les zones dégradées, en considérant notre « environnement » comme tout ce qui se trouve autour de nous, y compris l'air que nous respirons.

L'environnement est devenu à la mode, et la vapeur s'est inversée depuis les jours où l'on polluait la région sans aucun contrôle, ce qui entraîne des dépenses énormes dans la recherche de moyens acceptables pour mettre en dépôt les déchets dans notre monde surpeuplé.

Ce Bulletin aborde cet aspect pour les barrages de stériles et leurs bassins. Il considère les impacts sur l'environnement qui doivent être pris en compte lors de la conception, et la stabilité vis-à-vis de l'environnement à assurer pendant les nombreuses années de construction et pendant la période encore plus longue suivant la fermeture et la réhabilitation des barrages de stériles.

Ce Bulletin s'adresse plus particulièrement aux propriétaires ou gestionnaires d'exploitations minières, dont la responsabilité est d'assurer que les réglementations vis-à-vis de l'environnement sont respectées, et aux responsables de la conception, de la construction et de l'exploitation des barrages de stériles.

FOREWORD

Mining activities through the ages have despoiled the countryside, usually in areas out of the sight, hence out of the minds of the ruling classes. To maximise profit, expenditure on waste disposal was minimised, a process emphasised in the interests of efficiency, market forces and “ healthy ” competition. Huge mounds of waste were allowed to accumulate, uncompacted, at their angles of repose, ever closer to the miners’ camps that have become villages and towns. Modern electronic communications enables conditions everywhere to be known by everyone. The failure of the waste heap at Aberfan in 1966, that engulfed a school and houses, killing 144 of whom 116 were young school children, shocked the world.

Government regulations to clean up our rivers prevented mines from discharging their dirty water into them. Some coal mines constructed embankments of coarse discard across streams to act as filters and trap the fine black particles from their washeries, thus starting lagoons of fine material. As one became full, another would be started upstream. A cascade failure of three such uncontrolled lagoons discharged large volumes of heavy sludge into Buffalo Creek in 1972, causing 125 deaths and considerable destruction. In a sense this disaster could be said to have stemmed from an attempt to improve conditions in the countryside.

Such tragedies have increased governmental regulations and increased the desire to improve the despoiled countryside, now considered our “ environment ”, that is everything around us, including the air we breathe.

The “ environment ” has become the modern catch phrase and the pendulum has swung right over from the days of uncontrolled despoliation of the countryside, causing vast amounts of moneys to be spent on finding acceptable means for waste disposal within our overpopulated world.

This Bulletin addresses this aspect in relation to tailings dams and their retained lagoons. It considers the environmental impact assessment that must be made at the planning stage and environmental stability to be achieved during the long years of construction and the longer period after completion and rehabilitation.

It forms essential reading for the mine owner or manager whose responsibility it is to see that environmental requirements are met and to those responsible for planning and the construction/operation of tailings dams.

Le document s'appuie sur le rapport initial établi par J. Eurenus du Comité National Suédois des Grands Barrages, et a été préparé par le Sous-Comité des Barrages de Stériles du SANCOLD (Comité National Sud-Africain des Grands Barrages). Le comité de rédaction du SANCOLD comprenait : J. R. G. Williamson, Président, Prof. G. E. Blight, Rédacteur en chef, J. E. Boswell, K. A. Lyell, J. A. Wates, D. A. Williams. Qu'ils en soient tous vivement remerciés.

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

This text is based on the original paper by J. Eurenus of the Swedish National Committee on Large Dams, edited and augmented by the Tailings Dam Sub-Committee of SANCOLD (South African National Committee on Large Dams). The SANCOLD editorial committee members were : J. R. G. Williamson, Chairman, Prof. G. E. Blight, Editor-in-Chief, J. E. Boswell, K. A. Lyell, J. A. Wates, D. A. Williams. They deserve our best appreciation and thanks.

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

1. INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, l'industrie produit une grande diversité de déchets, tels que les stériles miniers, les résidus industriels, les déchets chimiques, les eaux usées, etc. Ces produits sont généralement retenus dans des barrages de stériles. Ces derniers doivent être considérés le plus souvent comme des ouvrages définitifs, ayant toujours des conséquences sur l'environnement. Les stériles miniers constituent un des problèmes majeurs de traitement pour les industriels, du fait de leurs caractéristiques et de leur important volume. Bien que l'on ait une très faible expérience du comportement à long terme de ces dépôts vis-à-vis de l'environnement, ce rapport se propose de commenter et de décrire les différents aspects de la conception et du projet de ces ouvrages en tenant compte des contraintes liées à l'environnement. Il est plus spécifiquement relatif aux dépôts ayant une grande durée de vie, pour lesquels des précautions à long terme vis-à-vis de l'environnement doivent être prises, et est destiné aux ingénieurs de barrages et non à ceux d'autres disciplines.

On devra prendre en compte les conditions sociales et climatiques différentes d'un pays à l'autre.

Les stériles sont des résidus ou des déchets issus de l'activité minière. Au terme du processus d'extraction, le minerai est broyé à une taille inférieure à 0,1-1 mm. Le métal contenu dans le minerai broyé est, en grande partie, récupéré mais des éléments polluants restent dans les résidus. Les stériles sont généralement transportés sous forme de boue à leur lieu de dépôt. L'eau récupérée après décanation est généralement recyclée vers la mine ou envoyée dans un autre bassin, parfois après une nouvelle purification.

Les aspects particuliers concernant la conception, l'exploitation et la sécurité des barrages de stériles ont été abordés dans les Bulletins n^{os} 45 et 74 de la CIGB : « Manuel des barrages et dépôts des stériles » et « Sécurité des barrages de stériles - Recommandations ». Le contenu de ces Bulletins n'est pas rappelé dans ce rapport.

Les stériles sont déposés à l'intérieur d'une retenue délimitée par un barrage, souvent constitué avec les stériles eux-mêmes ou parfois avec des remblais en terre ou en enrochement. Au fur et à mesure de la mise en dépôt des stériles, le barrage croît en hauteur. D'importantes quantités de stériles sont produites dans le monde. Les déchets miniers représentent, en fait, le plus fort pourcentage des matériaux manipulés dans le monde. Le tonnage mondial annuel a dépassé 5 milliards de tonnes en 1982. La mise en dépôt de stériles est une opération importante qui a toujours un impact sur l'environnement. Les ingénieurs et les scientifiques ont la responsabilité de réduire autant que possible cet impact dans la limite des contraintes physiques et financières.

Une définition large des conséquences sur l'environnement des barrages et dépôts de stériles est : **tout impact néfaste sur l'homme, les animaux, les plantes et leur habitat, causé par la mise en dépôt et la dissémination des stériles miniers ou**

1. INTRODUCTION

Industries in many countries generate a wide range of waste products, such as mine and industrial tailings, chemical wastes, process effluents, etc. These products are mostly impounded in tailings disposal dams. The dam deposits can mostly be considered as permanent structures and will always have impacts on the environment. Tailings from the mining process represent one of the biggest waste handling problems to the industry, due to the quality of the tailings and the very large volumes that are produced. Although there is very little experience of long-term environmental behaviour of these deposits, this report is intended to discuss and describe aspects of planning and design pertaining to the environment. It is written specifically for the case of extended life of tailings deposits where special long-term precautions must be taken for protection of the environment, and is intended for dam engineers, not those of other disciplines.

As climatic and social conditions vary in different countries of the world, these must be taken into account accordingly.

Tailings is a residue or waste product from mining activities. In the subsequent mineral extraction process the ore is ground-up to a size less than 0,1-1,0 mm. The metal content in the ground-up material is largely removed, but pollutants remain in the tailings residue. The tailings is generally transported as a slurry to a tailings dam for disposal. Supernatant water released from the tailings after deposition is generally recycled to the mill of the mine or released to another recipient possibly after additional purification.

Specific aspects relating to the design, operation and safety of tailings dams are contained in ICOLD Bulletins 45 and 74: Manual on Tailings Dams and Dumps, and Tailings Dam Safety - Guidelines, respectively. The material contained in these Bulletins will not be repeated in this text.

The tailings deposit will have an outer impounding structure or dam, often formed with the tailings itself but sometimes also with earth or rockfill walls. As more and more tailings are deposited, the dams are continuously raised. Large volumes of tailings are produced in many countries. Mine wastes, in fact represent the largest volumes of materials handled in the world. The world-wide annual tonnage handled exceeded 5 000 000 000 tons in 1982. Tailings disposal is a major operation and always has an impact on the environment. The engineer and scientist has the responsibility to reduce this impact as far as is possible, within the physical and monetary constraints that apply.

A broad definition of environmental impact as it arises as from tailings dams and tailings deposits is: **any negative impacts on man, animals, plants and their habitat caused by the disposal and dissemination of mine or industrial waste.** The

résidus industriels. Les atteintes à l'environnement sont très variées, allant d'un aspect visuel inacceptable à des fuites de résidus liquides en surface ou dans la nappe phréatique. La mise en dépôt de déchets est toujours à hauts risques, et la société est en droit de demander que ces risques soient acceptables et admissibles.

Diminuer les risques de pollution constitue une tâche plus difficile et plus complexe que celle envisagée par nos prédécesseurs. L'objectif des ingénieurs et scientifiques d'aujourd'hui doit être de diminuer l'impact à long terme sur l'environnement, les risques pour la santé, et de protéger la qualité des écosystèmes naturels.

Deux facteurs ont une influence prépondérante sur l'environnement; ce sont la stabilité de la retenue et la qualité des eaux provenant des dépôts. La stabilité doit être acceptable, non seulement durant l'exploitation, mais également après l'arrêt et la fermeture de l'exploitation de la mine et du dépôt. De même, les fuites en provenance de la retenue doivent être contrôlées durant la phase d'exploitation et après la fermeture du dépôt. Dans ce rapport, une attention particulière est portée sur la sécurité et la stabilité à long terme des barrages de stériles après fermeture et abandon de la mine.

negative aspects of tailings dams can impact on the environment in many ways, ranging from an unacceptable visual effect to the effect of leakage of hazardous fluids to the surface or groundwater. The disposal of any hazardous substance will always give rise to risk, which society has a right to demand must be reduced to an acceptable and assimilable level.

The task of reducing the risk of contamination from hazardous substances is larger and more complex than was experienced or anticipated by the predecessors of today's engineers and scientists. The goal of today's engineers and scientists should be to protect and improve the long-term conditions of the environment, to reduce risks to human health and safety and to protect the quality of natural ecosystems.

Two factors have a dominating influence on the environment, namely, the shear and surface stability of the impoundment and the quality of the water emanating from it. The stability must be acceptable not only during operation but also after decommissioning and closure of the mine and the deposit. Similarly, seepage from the impoundment must be controlled both during the operating life and after closure of the dam. In this report special emphasis is placed on the safety and stability of tailings dams during the long period after the mine is closed and abandoned.

2. ASPECTS RELATIFS À L'ENVIRONNEMENT

Les impacts des exploitations minières sur l'environnement sont bien connus. Parmi les plus significatifs (et certainement les plus visibles), on doit ranger ceux associés à la construction, l'exploitation et la fermeture des barrages de stériles. La non-gestion des stériles est potentiellement responsable de dégradations importantes sur l'environnement. Au contraire, une gestion des stériles de manière responsable vis-à-vis des problèmes d'environnement permet d'envisager un développement continu de l'activité minière et offre souvent l'opportunité de diminuer les effets néfastes sur l'environnement. Une gestion responsable vis-à-vis de l'environnement devrait se traduire, avant la construction de l'ouvrage, par une déclaration d'impact vis-à-vis de l'environnement (DIE). Son but serait de définir les parties de l'environnement sur lesquelles l'exploitation minière aurait un impact, de définir la nature de ces impacts et de faire des recommandations pour la gestion de l'environnement. Il est vital, si l'on veut se conformer aux réglementations en vigueur sur l'environnement, de gérer et de contrôler les effets de l'exploitation minière, et plus particulièrement des dépôts de stériles, sur l'environnement.

Un certain nombre d'exploitations minières n'ont pu bénéficier des nouvelles technologies pour protéger l'environnement. Beaucoup d'exploitations minières ont une longue histoire et les Ingénieurs sont confrontés à un vrai challenge pour améliorer les impacts sur l'environnement ou remédier aux effets néfastes dont les plus significatifs sont énumérés ci-après :

2.1. IMPACT SUR LA QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE

Le plus important problème de ce point de vue concerne le rejet direct de stériles dans les rivières, ce qui continue encore à être pratiqué dans de nombreux pays, en particulier ceux en voie de développement. Il en résulte généralement une large destruction de la faune et de l'écosystème fluvial et marin. La simple construction d'un barrage de stériles ne constitue pas une garantie vis-à-vis de l'environnement. Une stabilité insuffisante de la digue vis-à-vis des séismes ou même sous chargement statique peut se traduire par une destruction bien plus catastrophique du milieu naturel et humain.

Moins visible, mais néanmoins destructif vis-à-vis de l'environnement, est le rejet des eaux de décantation en excès dans les rivières. Quand ces rejets sont acides, ils transportent généralement en solution une charge plus importante d'éléments polluants, en particulier des métaux lourds tels que le chrome, le vanadium, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le cuivre, le zinc, l'arsenic, le plomb et le mercure.

La neutralisation de ces rejets acides n'est pas la « solution miracle ». La règle « dilution n'est pas la solution à la pollution » reste vraie particulièrement dans les

2. ENVIRONMENTAL ASPECTS

The impact of mining on the environment is well known. Some of the most significant (and certainly most visible) environmental impacts arising from mining are associated with the construction, operation and long-term performance of the mine tailings dams. The mis-management of tailings holds potential for considerable environmental degradation. In contrast, the management of tailings in an environmentally responsible manner upholds the principles of sustainable development in mining and, at times, even offers the opportunity for environmental enhancement. The environmentally responsible management of tailings is best initiated by an environmental impact assessment (EIA) before the dam is started. The EIA is intended to consider the environment upon which mining is likely to have an impact, assess the nature of those impacts and make recommendations with regard to environmental management. The on-going management or control of the impacts associated with mining and tailings disposal in particular, is vital if compliance with environmental standards is to be attained.

Not all mining has had the benefit of the somewhat new environmental technology. Many mining operations have a long history and present the engineer with a significant challenge to ameliorate or remediate the negative environmental impacts so caused. The most significant negative environmental impacts associated with tailings dams are listed below :

2.1. IMPACT ON SURFACE WATER QUALITY

The most serious concern in this regard is the direct discharge of tailings into rivers which continues to be practised in a number of countries especially in the developing world. Widespread destruction of fluvial and marine environments is usually the result. The mere construction of a tailings dam is no guarantee of environmental compliance in this regard. The lack of seismic and even static stability of a dam may result in much more catastrophic destruction of both the human and natural environment.

A less visible, but nevertheless also environmentally destructive is the discharge of excess supernatant effluent into water courses. When the discharge of tailings effluent is acidic it usually carries with it a greater load of contaminants in solution, particularly heavy metals such as vanadium, chromium, manganese, iron, cobalt, nickel, copper, zinc, arsenic, lead and mercury.

The neutralisation of acidic effluent discharge is no panacea. The maxim "dilution is no solution to pollution" holds true, particularly in arid climates

climats arides, où les ressources en eau de surface sont rares et entrent dans des cycles courts où l'eau est recyclée de nombreuses fois. La concentration en sels dissous des eaux naturelles peut alors atteindre un taux tel que des traitements extrêmement coûteux se révèlent ultérieurement nécessaires. Il est donc préférable, dans un premier temps, d'éviter de rejeter les eaux polluées. C'est pour cette raison que la législation de nombreux pays prévoit ou encourage le non-rejet de ces eaux polluées.

Avec cette philosophie, la suppression d'eau du cycle hydrologique peut, toutefois, avoir des effets non négligeables sur l'écosystème de la rivière à l'aval. Des effets additionnels, tels que la régulation des crues, le détournement et la régénération de la rivière doivent être également pris en compte.

2.2. IMPACTS SUR LA QUALITÉ DES NAPPES SOUTERRAINES

Dans les régions arides où les eaux de surface sont rares, les nappes souterraines, qui sont le plus souvent des nappes fossiles, sont très recherchées. L'implantation et le contrôle des dépôts de stériles doivent tenir compte de leur impact potentiel sur les nappes. Les risques de contamination d'un aquifère par des produits polluants provenant du dépôt de stériles doivent être appréciés et, dans certains cas, il peut être nécessaire de mettre en place une membrane, des mesures de détection des fuites, une auscultation de la nappe, et de prévoir les mesures correctives éventuelles.

2.3. IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

Dans les climats arides, le risque de pollution de l'air par les poussières transportées par le vent peut être un problème particulièrement important. Ce risque peut être éliminé en couvrant le dépôt de stériles avec un matériau résistant à l'érosion, ou en le végétalisant, ou les deux.

La couverture et la revégétalisation des dépôts sont orientées vers des méthodes permettant de réduire au maximum l'érosion par le vent. Elles doivent également, dans toute la mesure du possible, permettre de maintenir une humidité des stériles empêchant leur dessiccation et diminuant leur érodabilité. Dans le cadre d'une revégétalisation, des dispositions doivent être prises pour permettre à la végétation de s'installer. Encore faut-il sélectionner des espèces végétales résistantes à la sécheresse (et si possible aux métaux lourds), capables de se développer dans un milieu très défavorable.

D'autres risques de pollution de l'air par les dépôts de stériles miniers proviennent des réactions et processus de décomposition, comme la production de radon associée à la désintégration de l'uranium contenu dans des stériles, la production de méthane par les matières organiques et la production d'oxydes nitriques et sulfuriques résultant de la combustion spontanée ou d'autres processus de combustion.

where surface water resources are scarce and form part of a closed loop where water is re-cycled a number of times. Levels of dissolved salts in natural water resources become concentrated to such an extent that extremely costly remedial measures may be required later. It is far better to prevent discharge of poor quality water in the first place. For this reason, many countries have legislation requiring, or at least encouraging, a zero effluent discharge practice.

The effect of the removal of water from the hydrological cycle by the zero effluent discharge philosophy can however have significant effects on the downstream environment of the catchment. Additional impacts like flood attenuation, stream diversion and stream rejuvenation should also be considered.

2.2. IMPACTS ON GROUNDWATER QUALITY

In arid regions, where surface water resources are scarce, great reliance is placed on groundwater which is often fossil water. The location and control of tailings deposits must take careful cognisance of potential impact on groundwater aquifers. The risk of contamination of an aquifer by contaminants leaving the tailings deposit should be assessed and, in some cases, may necessitate the incorporation of a liner, leachate detection measures and groundwater monitoring and contingency remediation measures.

2.3. IMPACT ON AIR QUALITY

The creation of a dust hazard associated with windblown fine particulates may be particularly serious in arid environments. This hazard may be overcome by capping the tailings deposit with an erosion-resistant layer, or vegetation, of the exposed slopes, or both.

Operating practices and capping, re-vegetation efforts are focussed on methods of reducing windblown dust as far as possible. They should attempt, as far as possible, to maintain a moist tailings environment, thus preventing desiccation and reducing wind erosion. In designing a re-vegetation strategy, consideration must be given to preparing an environment suitable for plant growth, but at the same time selecting plant species which are drought (and possibly heavy metal) resistant, robust and able to grow under harsh environmental conditions.

Other air quality problems associated with mine tailings involve subsequent reactions and decay processes such as the production of radon gas associated with the radio-active decay of uranium in tailings, the production of methane from organic materials and the generation of nitrous and sulphurous oxides as a result of spontaneous combustion and other burning processes.

2.4. RÉHABILITATION ET REVÉGÉTALISATION DES BARRAGES DE STÉRILES

Un barrage en exploitation peut être bien géré, avec un impact minime sur l'environnement. Si, en fin d'exploitation, il est abandonné sans précautions particulières, il peut en résulter un impact sur l'environnement beaucoup plus grave. Aussi est-il important de réhabiliter les barrages de stériles (opération qui devrait débiter pendant l'exploitation et même dès le début de la construction) et de prévoir un plan de fermeture à long terme où les opérations d'entretien seront aussi limitées que possible. Dans un climat extrêmement aride, il n'est parfois pas possible ou même souhaitable de végétaliser le dépôt. Dans ces conditions, la protection du dépôt avec des matériaux graveleux, des résidus rocheux ou des matériaux similaires est souvent envisagée. Un choix judicieux des arbres, un remodelage et une végétalisation permettent de réduire de manière significative l'impact visuel et de mieux intégrer le dépôt dans le paysage.

Les pentes des talus réalisées pendant l'exploitation et le projet de réhabilitation doivent intégrer l'utilisation finale du dépôt comme celle des terrains adjacents.

Ces aspects sont examinés plus en détail au chapitre 10.

2.5. AUTRES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Un certain nombre d'autres effets doivent être considérés dans la gestion des barrages de stériles, tels que ceux sur les sites archéologiques, sur le contexte culturel ou socio-économique. D'autres aspects concernent les conséquences sur la faune, la flore et la vie sauvage, particulièrement pour les espèces rares et protégées, l'existence de radiations ionisantes associées aux stériles et le bruit, en particulier pendant la phase d'exploitation.

2.4. REHABILITATION AND RE-VEGETATION OF CLOSED TAILINGS DAMS

While an operating tailings dam may be well managed and the environmental impact minimised, if it is merely abandoned at the end of its useful life without proper end use planning and after-care, the environmental impact that results may be significantly worse than that which could have occurred during its operational life. For this reason, the rehabilitation of the tailings dam, (which should begin even during operation and as early as the construction stage) and the provision of a long-term, low maintenance, end-use plan for the complex, is critical. In extremely arid environments it may not be possible or desirable to establish vegetation on the deposit. In these situations, the mulching or covering of the deposit with gravel, mine waste rock or similar material is often contemplated. The judicious use of trees, landscaping and vegetation serves to significantly reduce the visual impact and enhance the aesthetic appeal of the tailings dam.

The slope angle at which embankments are built and the rehabilitation design that are selected need to incorporate the ultimate land use of the area, as well as the land use adjacent to the deposit.

These aspects are addressed more fully in chapter 10 of this text.

2.5. OTHER ENVIRONMENTAL IMPACTS

A number of other aspects require consideration in tailings dam management, including the effect on the archaeological, cultural or socio-economic environment. Further aspects include the effect on fauna and flora and wildlife, particularly rare or endangered species, the existence of ionising radiation associated with the tailings and the generation of noise, particularly during the operational phase of the tailings dam.

3. CARACTÉRISTIQUES DES STÉRILES

Les conséquences sur l'environnement des barrages de stériles sont directement influencées par les caractéristiques et les propriétés des stériles eux-mêmes. Leurs propriétés chimiques et mécaniques sont décrites dans le Bulletin de la CIGB n° 45 publié en 1982 puis ultérieurement révisé. Le lecteur peut également se référer au Bulletin de la CIGB n° 44a daté de 1989, pour obtenir une bibliographie plus détaillée des articles sur les propriétés des stériles. Ce paragraphe décrit quelques-unes des caractéristiques les plus critiques rencontrées dans les dépôts de stériles.

Dans de nombreux dépôts, la présence de sulfures, de métaux lourds, de produits chimiques et de matières organiques, entraîne un risque de réactions chimiques critiques. Le sujet est complexe; il est abordé plus en détail dans le chapitre 5.

L'exposition de stériles contenant des sulfures peut se traduire par des eaux de fuite acides. Ceci résulte essentiellement de l'oxydation des sulfures contenus dans la roche exposée à l'air et à l'eau. Les principaux ingrédients de la réaction sont : le sulfure, l'oxygène et l'eau. La réaction d'oxydation est souvent accélérée par une activité biologique. Les réactions biologique et chimique conduisent à une eau de pH faible, favorisant la mobilité des métaux lourds présents dans les stériles. Les eaux de percolation provenant de tels dépôts contiennent souvent des produits tels que des métaux lourds et des sulfates; elles sont très nuisibles pour les eaux naturelles.

Les rejets d'eaux acides ont probablement commencé avec le début de l'activité minière. En 1556, Georgius Agricola a publié un document sur l'activité minière et la fusion des métaux, qui constitue probablement la première référence concernant les effets nuisibles des eaux acides sur l'environnement. Dans de nombreux pays, l'exploitation de minerais sulfureux a commencé depuis plus de 1 000 ans. Les dépôts de stériles de ces vieilles exploitations peuvent être encore actifs de nos jours et relâcher des métaux lourds polluants. Ceci montre que si les procédés générant un milieu acide ne peuvent pas être maîtrisés, il peut en résulter à long terme une véritable menace pour l'environnement.

Les stériles d'uranium constituent un cas particulier. La désintégration de l'uranium produit du radon et d'autres rayonnements. La durée importante de ces processus conduit à considérer comme nécessaires des mesures spéciales de protection de l'environnement à long terme.

3. TAILINGS CHARACTERISTICS

The environmental performance of a tailings dam is largely influenced by the properties and characteristics of the individual tailings particles themselves. The range of chemical properties and mechanical characteristics which are relevant are described in ICOLD Bulletin No. 45 initially published in 1982 with subsequent revisions. The reader is also referred to ICOLD Bulletin No. 44a dated 1989, for a detailed bibliography of papers addressing tailings materials, properties and evaluation. This paragraph merely addresses some of the more important hazardous characteristics encountered in tailings disposal.

In many deposits, due to the presence of sulphides, heavy metals, chemicals and organics, there is a risk of hazardous reaction processes. The subject of these processes is very complex, and is addressed more fully in chapter 5.

Exposure of tailings containing sulphides may result in acid-drainage from the deposit. Acid-drainage is mostly a result of oxidisation of sulphide materials contained in rock, which is exposed to water and air. The principal ingredients in the process are: reactive sulphide minerals, oxygen and water. The oxidisation reactions are often accelerated by biological activity. The chemical and biological reactions yield low pH water, which may mobilise heavy metals in the tailings. Seepage from such a deposit thus often contains products such as heavy metals and sulphates, which can cause a detrimental impact on water quality in the environment.

Acid-drainage has probably been experienced since mining started. In 1556 Georgius Agricola published a document about mining and smelting, which contains probably the first reference of environmental impacts from acid-drainage. In many parts of the world, mining of sulphitic ores has been carried out for more than 1 000 years. Waste deposits from these old mines may still be active and release heavy metal pollutants. This indicates that if acid-producing processes are not properly controlled, they can pose a very serious long-term threat to the environment.

Uranium tailings represent a special environmental case. Radioactive decay of uranium produces radon gas and other radiation by products. Due to the very long lifetime of these processes, special measures for the long-term protection of the environment are usually considered necessary.

4. LES DIVERSES PHASES DES BARRAGES DE STÉRILES

On peut distinguer, pour les barrages de stériles, les phases suivantes :

- la sélection du site et la conception,
- le projet,
- la construction,
- l'exploitation,
- la réhabilitation,
- la phase à long terme.

Le site finalement choisi pour un barrage de stériles doit être le site le mieux adapté parmi toutes les solutions possibles. Pour chaque site possible, des études préliminaires géologique, hydrogéologique, géotechnique, et une étude d'impact sur l'environnement doivent être réalisées avec une analyse critique des points faibles de chacun des sites. Le choix final doit être rigoureux et effectué après les études d'impact sur l'environnement et sur le contexte sociologique.

Ces études doivent être prises en compte dans la conception et le projet, et l'ouvrage doit permettre de minimiser les atteintes à l'environnement.

Pendant la construction, le choix des zones d'emprunts pour les matériaux de construction doit être fait avec soin. Si ces zones servent ultérieurement de zone de dépôt des stériles, il faudra veiller à ne pas enlever un matériau qui pourrait servir de tapis étanche naturel permettant de limiter les infiltrations d'eau ou de contaminants dans des couches sous-jacentes plus perméables. Si la zone d'emprunt est prévue en dehors de l'emprise des stériles, on doit également se préoccuper de sa réhabilitation une fois la construction terminée. On veillera tout particulièrement à ce qu'une partie de l'environnement ne soit pas dévastée pour permettre ailleurs la réhabilitation d'un barrage.

La mise en dépôt et la gestion de la terre végétale, qui pourrait être neutralisée par le dépôt de stériles, nécessitent une certaine attention. De plus, pendant le débroussaillage, il faut veiller à n'enlever que la végétation qu'il est absolument nécessaire d'enlever.

On doit assurer la plantation d'arbres et d'espèces de la flore locale, qui contribuent à dissimuler le barrage de stériles et qui peuvent également permettre d'accélérer la reproduction des espèces de la flore locale sur le dépôt, une fois celui-ci réhabilité.

Pendant la construction du barrage, la compagnie minière contrôle les installations et les systèmes d'exploitation afin de satisfaire aux exigences requises par les organismes de contrôle. Aussi, les règlements sur l'environnement sont-ils générale-

4. PHASES OF TAILINGS DAMS

A tailings dam can be considered to pass through the following phases :

- Siting and planning
- Design
- Construction
- Operating
- Rehabilitation
- Long-term.

The final choice of a site for a tailings dam should be the result of the consideration of the relative merits of as many alternative sites as possible. For each of these sites preliminary geological, geohydrological, geotechnical and environmental impact studies should be performed, followed by a fatal flaw analysis. A final choice should only be made after selecting the more favourable sites to a rigorous process of environmental and social impact studies.

The results of the environmental and social impact studies carried out to select the site should be considered during design, and the facility should be designed to minimize adverse impacts.

During the construction phase attention should be given to the establishment of borrow pits for construction material. If the material is borrowed from the area which will later be covered by tailings, care should be taken not to remove material which could serve as a natural liner, to prevent the escape of excessive volumes of water or contaminant into more permeable sub-strata. If the borrow area is established outside the tailings disposal area then care should be taken in the rehabilitation and end use of the borrow area once construction is complete. Particular care should be taken in order to ensure that one part of the environment is not devastated in order to rehabilitate a tailings dam elsewhere.

The stockpiling and management of topsoil which would otherwise be sterilised by tailings disposal requires attention. In addition, during the site clearing stage, when vegetation is removed for construction, care should be taken to remove only that vegetation which it is absolutely necessary to remove.

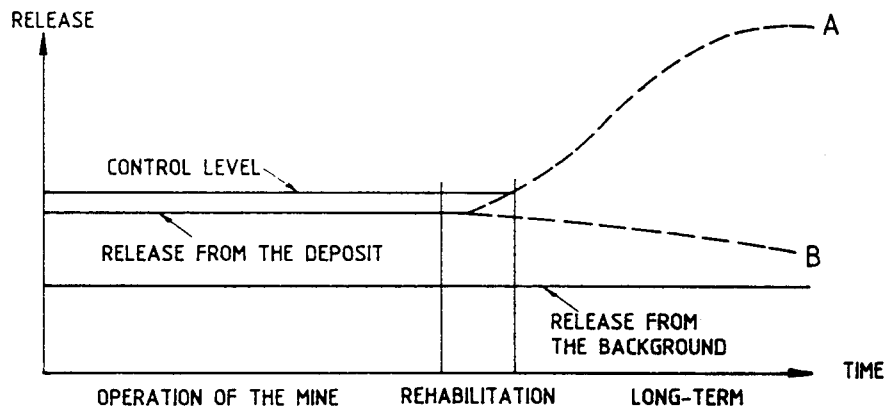
The establishment of trees and other indigenous flora which can be useful in providing screening of the tailings dam from adjacent land use and which can also assist with more rapid propagation of indigenous species onto the tailings deposit once rehabilitation and re-vegetation begins, should be ensured.

During the operating life of a tailings dam, staff from the mining company control installations and systems to ensure that they meet the requirements of the licensing agencies. Consequently, the environmental safety requirements can

ment satisfaits pendant l'exploitation du barrage de stériles si les techniques industrielles modernes disponibles sont utilisées.

Après la phase d'exploitation, les caractéristiques de l'eau de la retenue et des stériles évoluent. Après un certain temps, un équilibre est atteint lorsque le niveau de l'eau et les rejets sont contrôlés par des processus naturels. On considère que la phase de réhabilitation est terminée lorsque la toxicité des rejets polluants s'approche du taux existant naturellement dans le sol ou d'une teneur acceptable vis-à-vis de l'environnement. Les barrages de stériles sont normalement contrôlés par la compagnie minière, et leurs effets néfastes sur l'environnement peuvent généralement être évités même pendant la phase de réhabilitation.

Pour la phase à long terme d'un barrage de stériles, la définition des mesures de sécurité à prendre vis-à-vis de l'environnement est un problème relativement complexe. Afin de comprendre ce qui pourrait arriver pendant la phase à long terme, il est nécessaire d'estimer l'évolution possible, au cours du temps, des divers ouvrages de la retenue. Une fois l'exploitation terminée, la surveillance active du dépôt décroît jusqu'à atteindre un état où les systèmes naturels passifs régissent les rejets du dépôt. Quelques cas possibles sont illustrés sur la Fig. 1. Ils sont purement schématiques, et ont pour but d'illustrer ce concept, plutôt que de donner une estimation du taux de rejet pendant la phase à long terme.



La courbe A illustre le cas où aucune précaution n'est prise pour réduire les risques de rejets. Dans cet exemple, les rejets augmentent graduellement pour atteindre un niveau supérieur à celui contrôlé pendant la phase d'exploitation. Il est possible que, dans le futur, la courbe se stabilise à un nouveau niveau, inacceptable pour l'environnement.

La courbe B illustre, au contraire, le cas où les rejets à long terme diminuent jusqu'à un niveau inférieur à celui contrôlé pendant l'exploitation. Les systèmes de contrôle existant pendant l'exploitation sont alors remplacés par des processus naturels qui, au cours du temps, conduisent à un niveau acceptable. Chaque barrage ou dépôt de stériles actifs devrait être étudié, conçu et exploité afin de correspondre à ce cas.

usually be satisfied during the operation of a tailings dam when using technology which is currently available to the industry.

When deposition operations have ceased, the characteristics of the water in the pond and the tailings will change. Over a period of time an equilibrium will be reached, when the water level and the release from the pond are controlled by natural systems. The end of the rehabilitation phase is normally considered to be reached when the toxicity of any released contaminant approaches the natural level of the background or other environmentally acceptable levels. Tailings dams are normally controlled by staff from the mining company and harmful impact on the environment can normally be avoided, even during the rehabilitation phase.

During the long-term phase, the creation of an environmentally safe containment for a tailings deposit is a more complex problem. In order to understand what will happen during the long-term phase, it is necessary to clarify how the behaviour of a tailings facility might vary in time. Once the operations of a mine have ceased, the reliance on active, staff-controlled systems will decrease until a stage is reached in which natural passive systems will determine the release from a deposit. A few possible cases are illustrated on Fig. 1. These cases are purely schematic and intended to show the intent of the concept rather than predict the release rate during the long-term phase

Fig. 1

Release levels from a tailings dam with time
Niveaux des rejets d'un barrage de stériles en fonction du temps

Release	<i>Rejet</i>
Control level	<i>Niveau de contrôle</i>
Release from the deposit	<i>Rejet du dépôt</i>
Release from the background	<i>État antérieur</i>
Operation of the mine	<i>Exploitation de la mine</i>
Rehabilitation	<i>Réhabilitation</i>
Long-term	<i>Long terme</i>
Time	<i>Temps</i>

Curve A might apply if no attempts are made to restrict hazardous releases. In this example the release would gradually rise to levels above the control level applied during the operating phase. Sometime in the future the curve would presumably stabilise at a new level, unacceptable from an environmental point of view.

Curve B, on the other hand, illustrates a case in which the long-term release decreases to a level lower than the operating phase. In that case, control systems during operation are replaced by natural systems and, in time, a new and acceptable level is achieved. Any tailings dam and deposit containing reactive tailings should be planned, designed and operated to fulfil this demand.

Par définition, on considère que les conditions à long terme s'achèvent lorsqu'un rejet stable et d'un niveau acceptable est obtenu. La durée de la phase à long terme dépend de la durée des réactions et processus nuisibles qui se produisent à l'intérieur du dépôt de stériles. Ils continueront tant que les stériles ne seront pas en équilibre avec le milieu extérieur. Le processus de production de produits acides peut durer pendant de nombreuses années. Pour être assuré de la sécurité d'un dépôt vis-à-vis de l'environnement, il est donc nécessaire de considérer des périodes de plusieurs siècles, voire même des millénaires. Même si des processus nuisibles ne se produisent pas, il est recommandé de considérer des périodes de temps relativement longues parce qu'il n'est pas aisé de déplacer un barrage de stériles après la fermeture de la mine.

By definition, long-term conditions arise at that point in time, when a stable and acceptably low release has been achieved. The duration of the long-term phase depends on the duration of harmful reactions or processes within the tailings deposits. They will continue until the tailings is in equilibrium with the environment. Acid-producing processes may continue for many years. It is therefore necessary to consider periods of centuries, or even millenia, for an environmentally safe deposit to result. Even if harmful processes do not occur, it is recommended to consider long time periods, because a tailings dam cannot easily be removed after the mine is closed.

5. RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT PENDANT L'EXPLOITATION ET LA RÉHABILITATION

5.1. GÉNÉRALITÉS

Il a été montré précédemment l'importance de considérer, dès le début du projet et de l'exploitation, les effets sur l'environnement au cours de la phase à long terme. Généralement, une fermeture du dépôt impliquera, soit le maintien en permanence d'une lame d'eau sur les stériles pour empêcher le passage de l'oxygène, soit une mise hors d'eau des stériles et une réhabilitation du dépôt par un remodelage ou une couverture avec divers matériaux ou/et une revégétalisation. Une submersion des stériles est actuellement le moyen de contrôle le plus efficace pour empêcher l'oxygène d'entrer dans les stériles. La teneur en oxygène et sa diffusion à travers l'eau sont faibles. Cependant, il peut y avoir certaines oppositions à cette technique. Par exemple : un manque d'enthousiasme des parties concernées pour accepter la responsabilité d'un entretien permanent; l'incompatibilité avec une reconversion à long terme des terrains en terres agricoles; un risque de séismes répétés; une pollution des nappes par les percolations permanentes à travers les stériles saturés; un climat aride.

Les barrages de stériles peuvent être mis hors d'eau lors de leur réhabilitation bien que les stériles aient été déposés initialement sous l'eau ou par voie semi-aérienne. Le procédé est généralement dicté par les conditions climatiques. Dans de nombreux pays, la rareté en eau est un facteur déterminant dans le choix du type de mise en dépôt, et des mesures draconiennes sont prises pour réduire la consommation d'eau.

5.2. BILAN HYDRAULIQUE

5.2.1. Pour les dépôts sous l'eau, des mesures doivent être prises pour que la retenue soit comparable à un lac avec un point d'exhaure. Des études ont montré que la lame d'eau devait avoir une certaine épaisseur pour éviter les réactions nocives dans les stériles. Cette épaisseur est fonction de facteurs tels que le climat, le pourcentage de sulfures, la superficie de la retenue, etc.... Une profondeur d'au moins un mètre, mais pouvant atteindre trois mètres, est souvent considérée comme acceptable vis-à-vis de la qualité des eaux en aval du barrage. Le dépôt doit être localisé dans une vallée ou sur une pente et avoir un bassin versant garantissant l'immersion permanente des stériles, en tenant compte des pertes d'eau dues aux fuites et à l'évaporation. Toutefois, le bassin versant ne doit pas être trop grand car, dans ce cas, l'alimentation en eau serait trop importante et nécessiterait des ouvrages d'évacuation compliqués et coûteux. La taille optimale du bassin versant est

5. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING OPERATING AND REHABILITATION PHASES

5.1. GENERAL

The importance of designing and operating a tailings dam from the very beginning to incorporate long-term environmental considerations has already been stressed. Generally long-term closure will involve either maintaining permanent water cover as a control measure to exclude oxygen, or the dam will be largely dewatered and generally rehabilitated by re-shaping and cladding with various cover materials and/or by vegetation. Water cover is at present probably the most effective control measure to exclude oxygen from tailings. The oxygen content and its diffusion through water is low. However, there are sometimes conditions which mitigate against the use of permanent submergence. Examples are : unwillingness by parties concerned to accept responsibility for permanent care and maintenance; incompatibility with long-term land use objectives to return the land to agricultural productivity; subjection to repeated long-term earthquakes; pollution of groundwater resources by seepage from permanently saturated tailings; dry climatic conditions.

Tailings dams can also be largely dewatered during rehabilitation although they may be operated initially under saturated or sub-aerial deposition conditions, usually dictated by climatic conditions. In many areas of the world, the scarcity of water is an overriding consideration in the choice of disposal methods, and extreme measures are taken to reduce water consumption.

5.2. WATER BALANCE

5.2.1. For permanent under water storage of tailings, measures should be taken, which allow the pond to perform as a lake with a natural outlet. There are studies that indicate that the water should have a certain depth to avoid harmful reactions in the tailings. The necessary water depth depends on factors such as climate, content of sulphides, pond area, etc. A water depth of at least 1 m, and sometimes up to 3 m is often considered to provide an acceptable water quality downstream of the dam. The deposit must be located in a valley or on a slope and have a certain catchment area, sufficient to guarantee a permanent under water placement of the tailings, taking into account water losses from leakage and evaporation. The catchment area should not, however, be too big, in which case the inflow can be very high and require complicated and expensive diversion facilities. An adequate size of the catchment area is determined by climatic conditions, the

déterminée par les conditions climatiques, la surface de la retenue et la perméabilité du barrage et de sa fondation. Dans les régions présentant de longues périodes de sécheresse et une forte évaporation, ce type de protection peut se révéler impossible.

5.2.2. Un dépôt qui sera mis hors d'eau doit être conçu et exploité afin que son alimentation en eau soit minimale; c'est le cas d'un barrage de ceinture ou d'un barrage de vallée avec des systèmes de fossés permettant d'intercepter et de dévier les eaux naturelles de surface. On doit s'assurer que ce système peut supporter les crues exceptionnelles et, même dans la plupart des cas, la crue maximale probable (PMF).

5.2.3. Dans tous les cas, on doit considérer les différents facteurs hydrologiques, c'est-à-dire que le bilan hydraulique doit tenir compte des apports et rejets à savoir : la pluie directe, les eaux de ruissellement, l'eau dans les stériles, les apports de la nappe phréatique dans la retenue, l'eau de décantation, l'eau interstitielle, l'évaporation, la percolation en dehors du barrage en surface et dans le sol.

Naturellement, toutes les formes de percolation doivent être analysées vis-à-vis de leur impact à long terme sur l'environnement.

5.3. SÉCURITÉ À LONG TERME

5.3.1. Généralités

Un barrage de stériles peut présenter une sécurité satisfaisante sur une longue période. La durée importante de la phase à long terme complique l'estimation des processus qui pourraient être nuisibles à la sécurité du barrage. Quoiqu'il en soit, en se basant sur les connaissances actuelles, les trois classes suivantes de mécanismes de rupture doivent être considérées dans la conception des barrages de stériles correspondant à la phase à long terme :

- rupture de la fondation ou du corps du barrage,
- ruptures dues à des événements extrêmes tels que les crues, les séismes ou des ouragans,
- ruptures dues à des dégradations lentes, comme l'érosion par l'eau et le vent, les effets du gel et de la glace, l'altération des matériaux de remblai et les dégradations dues à la végétation et aux animaux.

La probabilité d'événements extrêmes est proportionnellement plus grande pendant la phase à long terme. Les données historiques actuelles couvrent une période d'une centaine d'années environ, deux cents ans au plus. Bien que les conditions qui existeront dans un futur lointain nous soient inconnues, il est certain que les événements extrêmes auxquels un barrage de stériles sera soumis seront plus importants que ceux actuellement connus. Il est difficile de quantifier la probabilité des variations extrêmes. Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de considérer les conséquences de tels événements dans la conception des barrages en stériles. L'étude de la stabilité à long terme doit être faite en utilisant des méthodes et des matériaux qui ne poseront pas de problèmes sérieux aux futures générations.

area of the pond and the permeability of the dams and the underlying foundation. In areas with long dry periods and high evaporation it may be impossible to use under water deposits.

5.2.2. A deposit to be dewatered should be designed and operated so that minimal natural water inflow can occur, generally as a ring dyke or a walley dam with interception ditches to intercept and divert natural surface water. Care should be taken to ensure that extreme flood events, in most cases the probable maximum flood (PMF), can be accommodated by these interception ditches.

5.2.3. In all cases the normal hydrological factors used need to be considered, i.e. the water balance should accommodate inflows and outflows, viz: direct rainfall, surface inflow, water in tailings stream, groundwater seepage into dam, decanted water, water retained in voids, evaporation, seepage out of dam above and into the ground.

Naturally all forms of seepage are the subject of the most important long term environmental concern.

5.3. LONG-TERM SAFETY

5.3.1. General

A tailings dam can be given an adequate safety for a long period of time. The longevity of the long-term phase makes it difficult to envisage future processes, which may have a negative influence on the safety. However, based on current knowledge, the following three classes of failure mechanisms should be considered, when designing tailings dams for the long-term phase :

- Slope failures in the foundation or in the dam proper
- Extreme events such as floods, earthquakes and high winds

- Slow deterioration actions, such as water and wind erosion, frost and ice forces, weathering of fill materials and intrusion by vegetation and animals.

The likelihood of extreme events is proportionally large in the long-term phase. Existing historical data normally cover a period of about a hundred years, perhaps a couple of hundred years at the most. While conditions in the distant future are unknown, it is certain that the extremes, to which a tailings dam will be subjected, will be greater than the recorded. It is difficult to quantify the likelihood of extreme changes. However, it is necessary to consider and take into account the consequences of such events, when designing a tailings dam. The approach to long-term stability should always be to apply methods and to use materials which will not impose serious problems for future generations.

5.3.2. Stabilité des talus

Les barrages doivent répondre aux critères classiques de stabilité des talus avec un coefficient de sécurité satisfaisant. Les résultats des calculs doivent être examinés soigneusement. Il est impossible de prendre entièrement en compte les variations des propriétés des sols et des stériles de même que celles des pressions interstitielles sur une très longue période de temps. Le bon sens, l'expérience et le jugement doivent entrer en jeu dans l'estimation de la stabilité. Comme d'autres aspects de la conception des barrages et de la géotechnique, l'analyse de la stabilité à long terme est, dans une large mesure, empirique ou semi-empirique, et doit être considérée comme tel. L'estimation de cette stabilité doit toujours être faite en association avec l'étude du comportement de sols naturels comparables.

Le paragraphe 5.5. traite plus particulièrement de ce sujet.

5.3.3. Événements extrêmes

Les crues sont les événements les plus probables pouvant entraîner la rupture d'un barrage de stériles par déversement. Ce type de rupture conduit généralement à un déversement important de stériles dans la nature, et peut parfois constituer une menace pour le public. Les méthodes de calcul des crues sont actuellement bien développées, et comprennent la détermination statistique de crues de périodes de retour données ainsi que la détermination des crues extrêmes à partir des conditions météorologiques et climatiques sans faire appel à leur probabilité d'occurrence. La conception des barrages de stériles importants, dont la rupture se traduirait par des pertes en vies humaines, des dégâts matériels et des atteintes à l'environnement importants, doit être basée sur la crue maximale probable (PMF).

Les forces dynamiques provoquées par les tremblements de terres peuvent entraîner la liquéfaction des stériles. Celle-ci crée des forces transitoires supplémentaires appliquées au barrage, phénomène qui se produit rarement dans les barrages classiques de stockage d'eau, puisqu'ils présentent rarement des dépôts silteux en quantité importante. En conséquence, la détermination de la stabilité vis-à-vis des séismes est un point important de la stabilité à long terme des barrages de stériles.

Un barrage de stériles construit dans une zone à risques sismiques doit être dimensionné avec les règles appropriées. L'analyse peut être soit probabiliste, soit déterministe. La méthode probabiliste est basée sur les séismes ayant eu lieu et détermine la probabilité de certains séismes dans le futur. La méthode déterministe, au contraire, ne tient pas compte de la probabilité d'apparition des séismes. Le séisme déterminé est supposé être le plus important susceptible de se produire d'après les données géologiques, sans tenir compte des données historiques. Par analogie avec la crue maximale probable (PMF), ce séisme est désigné sous le nom de séisme maximal possible (MCE). Pour les barrages de stériles les plus importants, dont la rupture se traduirait par des pertes humaines, des dommages matériels et des atteintes à l'environnement considérables, l'analyse sismique doit être basée sur le séisme maximal possible. Même si le barrage subit d'importants dommages sous le séisme maximal possible, l'essentiel est qu'il doit rester stable et ne pas déverser de déchets dans l'environnement.

5.3.2. Slope stability

Dams must fulfil conventional slope stability criteria with an acceptably high safety factor. Application of the results must be examined carefully. It is impossible to fully account for the variations of soil and tailings properties as well as for the pore pressure response during long periods of time. Common sense, experience and judgement must be incorporated in the estimation of stability. Together with other aspects of dam design and of geotechnical engineering, long-term stability analysis should to a great extent be considered empirical or semi-empirical in nature and used as such. An estimation of the long-term stability should always be made in combination with the behavioural study of similar natural soil formations.

Section 5.5. deals with this topic more fully.

5.3.3. Extreme events

Floods represent one of the most likely events which can cause a tailings dam failure due to overtopping. Such a failure is also likely to result in large losses of tailings material to the environment and may sometimes impose a threat to the public. Methods for calculating of floods are well developed and include statically derived return-period floods and extreme floods, determined by meteorological and climatic conditions without any regard to likelihood of occurrence. The design of major tailings dams, where failure could result in loss of life, extensive property or environmental damage, should be based on the PMF.

Dynamic forces due to earthquakes may result in liquefaction of the tailings. Liquefied tailings in the pond will place additional transient forces on the dam, which rarely occurs for conventional water dams, as they are seldom subjected to heavy silt deposit loadings. Consequently, determination of the stability under earthquake loading is an important aspect for the long-term stability of a tailings dam.

A tailings dam to be built in a region of seismic activity should be designed to appropriate standards. This can be done either on a probabilistic or deterministic basis. The probabilistic method is based on historical earthquakes and is used to determine the likelihood of certain earthquakes in the future. The deterministic method on the other hand does not account for the likelihood of occurrences of earthquakes. The determined earthquake is considered to be the largest that could occur based on geological data, without regard for historical events. Analogous to the PMF this earthquake is referred to as Maximum Credible Earthquake. Major tailings dams, where a failure could result in loss of life and extensive damages to property and environment, should be designed for the Maximum Credible Earthquake. Even if the tailings dam will be badly damaged by the Maximum Credible Earthquake, the essential criterion is that the dam shall remain stable and not allow hazardous releases to the environment.

Les vents très forts se manifestant lors de tornades, cyclones et dépressions ont une influence négative sur la stabilité des barrages. Les risques de ruptures résultent de l'effet des vagues et de déversements par-dessus de la crête du barrage. Les barrages présentant une retenue de grande surface doivent avoir une revanche importante et leur talus amont doit être protégé contre l'érosion et stable sous l'action des vagues.

5.4. EFFETS D'UNE DÉGRADATION LENTE

Une altération lente ou une dégradation progressive peuvent conduire à une rupture d'ensemble et peuvent avoir à long terme des conséquences très néfastes vis-à-vis de l'environnement. Il est donc important de prendre en considération les mesures permettant d'améliorer la stabilité au stade de la conception, du projet, de l'exploitation et de la fermeture d'un dépôt de stériles.

Les processus de dégradation lente abordés dans ce chapitre sont :

- l'érosion interne due à l'eau (renards),
- l'érosion externe et l'envasement dues à l'eau,
- l'érosion externe et le dépôt de matières solides par le vent,
- les effets du gel et de la glace,
- l'altération,
- les dégradations dues à l'activité humaine
- les variations climatiques et l'altération des sols de surface.

Une rupture du barrage ou des atteintes à l'environnement résultent généralement de l'action combinée d'un ou plusieurs de ces processus de dégradation à long terme. Le climat, les propriétés des stériles et la géométrie du projet permettent, quoi qu'il en soit, de définir lequel de ces processus sera vraisemblablement prépondérant.

5.4.1. Érosion interne due à l'eau

L'érosion interne ou renard peut résulter d'écoulements permanents ou transitoires à l'intérieur de stériles érodables. L'érosion peut provoquer la migration de stériles dans l'environnement et créer des chemins d'écoulements préférentiels pour une érosion ultérieure par l'eau de pluie. L'érosion interne peut également entraîner un raidissement local des talus remettant parfois en cause leur stabilité et leur intégrité.

L'érosion interne apparaît seulement lorsqu'un gradient hydraulique existe dans des stériles érodables et qu'un cheminement d'eau préférentiel se crée, tel qu'une fissure ou des vides (comme ceux laissés par une conduite enterrée abandonnée), le long duquel les matériaux transportés peuvent migrer. Dans certains cas particuliers, la fraction fine des stériles peut migrer à travers la fraction plus grossière, sans présence de fissures ou de vides, mais ces cas sont extrêmement rares.

High winds from tornados, cyclones and low pressure systems will have a negative influence on dam stability. Risk of failure is associated with wave actions and overtopping of the dam crest. Dams surrounding ponds with large water surfaces must have a high freeboard and the upstream slope must be protected from erosion and be stable against wave actions.

5.4. SLOW DETERIORATIVE ACTIONS

Slow deteriorative processes or progressive degradation may lead to overall failure and may have severe adverse long-term environmental consequences. Sustainability of ameliorative stabilisation measures must thus be given careful consideration in the planning, design, operation and closure of tailings deposits.

Slow deteriorative processes which are considered in this chapter include :

- internal erosion by water (piping)
- external erosion and siltation by water
- external erosion and siltation by wind
- frost and ice action
- weathering
- anthropogenic damage
- climatic variability and substrata deterioration.

It is usually the combined effect of one or more of these long-term deteriorative processes which results in failure or environmental damage. Climate, tailings properties and geometry will however dictate which of these processes is likely to be the most prominent.

5.4.1. Internal erosion by water

Internal erosion or piping may be caused by perennial or transient flow of water through erodible tailings material. The erosion can cause migration of tailings into the environment and could open up pathways for further erosion by stormwater. Internal erosion could also cause local steepening and thereby induce slope stability and further loss of integrity.

Internal erosion can only occur where a hydraulic gradient exists in erodible tailings material and where a flow path, such as a crack or void (such as that left by an abandoned buried pipe), along which dislodged material can migrate, is present. In special cases the very fine fraction of tailings could migrate through a coarser matrix without the presence of a crack or void, but such cases are extremely rare.

En pratique, les renards apparaissent le long de fissures de dessiccation, de retrait ou de déformation par cisaillement en périphérie du remblai de la retenue de stockage de stériles. Seuls les stériles de granulométrie fine qui sèchent lentement peuvent présenter des fissures relativement profondes ou d'extension importante, longtemps après la fermeture de l'exploitation. Ceci représente un risque notable vis-à-vis de l'environnement, à moins qu'un entretien continu ne soit prévu.

Les instabilités les plus communes dues aux phénomènes d'érosion interne sont les suivantes :

- le retrait associé à la dessiccation sur les risbermes, qui provoque des cheminements préférentiels pour l'eau qui s'accumule sur les risbermes, créant ainsi un passage pour une érosion ultérieure plus importante par les eaux de ruissellement;
- les cheminements le long de conduites abandonnées, de conduites de drainage et le long de structures qui, éventuellement, se corrodent et s'effondrent, créant ainsi des passages facilitant l'apparition de renards, l'érosion par les eaux de ruissellement et une possible instabilité d'ensemble;
- dans les digues périphériques construites par voie hydraulique, qui peuvent être soumises au retrait et se fissurer après construction. Lorsque la vitesse de montée du dépôt est rapide, les stériles qui viennent d'être déposés peuvent ne pas avoir le temps de sécher suffisamment avant d'être recouverts par la couche suivante. Des fissures de retrait profondes peuvent ensuite se produire pendant les périodes sèches et l'eau ou les stériles les plus récents peuvent s'y infiltrer.
- sur les digues périphériques, le gel peut empêcher la dessiccation et la consolidation des stériles. Le dégel peut entraîner des fissurations par dessiccation et distorsion.

Ces dégradations peuvent être évitées avec une conception et un projet bien adaptés, et un contrôle pendant l'exploitation et la fermeture du dépôt. Elles dépendent des conditions climatiques, des propriétés des stériles, de la géométrie et des techniques de construction.

5.4.2. Érosion externe et envasement

La vitesse d'érosion est fonction d'un certain nombre de facteurs. Les plus importants sont donnés par l'équation dite « Universal Soil Loss Equation » (Wishmeyer et al. 1978, Israelsson 1980) (Voir également chapitre 9).

$$A = R \times K \times L \times S \times P \times C \dots\dots (5.1)$$

où

- A = sol perdu par érosion (t/h)
- R = coefficient de précipitation ou pouvoir érosif de la pluie (index EI)
- K = coefficient de sol (sol perdu/surface érodée)
- L = coefficient de longueur des talus
- S = coefficient de pente des talus
- P = coefficient de contrôle de l'érosion
- C = coefficient de la végétalisation

In practice piping usually occurs along cracks created by desiccation, shrinkage or distortion of the outer walls of tailings impoundments. Finer grained tailings which dry out slowly may only develop cracks of sufficient depth or lateral extent long after closure. This may represent a significant environmental hazard unless ongoing maintenance is provided.

The most common forms of long-term instability brought about by piping are the following :

- in berms or benches where shrinkage associated with desiccation provides a pathway for water which accumulates on the berm to erode away retaining structures and thereby create a route for more severe stormwater erosion to follow;
- along abandoned penstock, berm drainage pipes and structures which eventually corrode and collapse thereby creating pathways for piping, stormwater erosion and possibly overall instability;
- in outer perimeter dykes constructed by hydraulic filling, which may shrink and crack after placement. In instances where the rate of rise is high, freshly placed tailings may not dry sufficiently before the next layer is deposited. Deep shrinkage cracking may then follow in dry periods and water, or fresh tailings, can then pipe through these cracks; and
- in outer perimeter dykes freezing may inhibit adequate desiccation and consolidation of the tailings. Subsequent thawing could result in cracking through desiccation and distortion.

Deteriorative action may be prevented by adequate planning, suitable design, control of operation and at closures. Measures required will depend on climatic conditions, tailings properties, geometry and construction techniques.

5.4.2. External erosion and siltation by water

Erosion rate is a function of a variety of factors. The erosion rate may be related to the most significant of these factors in the Universal Soil Loss Equation (Wishmeyer et al. 1978, Israelsson 1980) (see also Chapter 9).

$$A = R \times K \times L \times S \times P \times C \dots\dots (5.1)$$

where

- A = Soil loss by Erosion (tons/hr)
- R = Precipitation factor or erosivity of rain (EI index)
- K = Soil factor (soil loss/unit of erosivity)
- L = Slope length factor
- S = Slope gradient factor
- P = Erosion control factor
- C = Crop management factor.

Malheureusement, les valeurs des différents coefficients de l'équation 5.1 n'ont pas été définies pour les stériles ou pour les pentes relativement raides des barrages de stériles.

Pour un barrage de stériles et un climat donnés, seules la pente et la longueur des talus peuvent être modifiées afin de contrôler l'érosion, à moins qu'une stabilisation artificielle ou une végétalisation ne soient envisagées.

Généralement, la végétalisation est le moyen le plus efficace pour maîtriser l'érosion de surface des stériles. Sa relative efficacité dépend néanmoins des facteurs climatiques et du niveau d'entretien prévu ou requis. Plus le déficit en eau est important, plus il devient difficile de maintenir une végétation sur les stériles; en pays aride ceci peut se révéler impossible.

L'utilisation de la végétation ne peut se faire que par une approche empirique. Aucune formule simple n'existe pour toutes les situations, mais en tenant compte de l'expérience acquise, on obtient généralement le succès (voir chapitre 10).

L'érosion peut également résulter de l'accumulation des eaux de ruissellement en cas d'orage et de déversement par-dessus les digues. La géométrie des barrages de stériles doit donc être conçue pour maîtriser l'érosion pendant l'exploitation et après la fermeture. A cet égard et pour un ouvrage type, une attention plus particulière doit être portée sur la conception des éléments suivants :

- risbermes et digues périphériques,
- conduites et évacuateurs de crue permettant d'évacuer les eaux excédentaires,
- bassins d'orage permettant de retenir les eaux de ruissellement des fortes pluies, et facilitant la décantation des éléments solides en suspension,
- barrages de rétention retenant les eaux de ruissellement polluées et facilitant la décantation des éléments solides en suspension,
- tranchées, risbermes et ouvrages déviant les eaux de ruissellement amont autour et au large du barrage de stériles.

Le choix du nombre et de l'emplacement de ces éléments dépend des circonstances. Il doit être effectué en tenant compte des risques et conséquences d'une rupture. Le risque accepté d'une rupture après fermeture peut être plus faible que celui admis pendant l'exploitation, d'une part, parce que les conséquences d'une rupture pourraient être plus dramatiques et, d'autre part, parce que l'exploitant ne sera plus là pour entreprendre les réparations nécessaires.

Les conséquences de l'alluvionnement sur la sécurité à long terme doivent également être prises en compte dans les projets, en particulier dans la phase de fermeture. L'alluvionnement peut obstruer les conduites de drainage, les canaux et les barrages. La submersion et l'érosion qui en résultent peuvent alors se produire plus fréquemment que prévu. Si l'alluvionnement est inévitable, la capacité de la retenue et la revanche devront être prévues pour prendre le relais des ouvrages envasés. Si cela n'est pas possible, un entretien continu après la fermeture de l'exploitation sera nécessaire.

Unfortunately, values of the various factors in equation (5.1) have not been established for tailings, or for the relatively steep slopes of tailings dams.

For a given type of tailings and a given climatic region only the slope, inclination and length can be varied to control erosion unless artificial stabilisers or vegetation is introduced.

Vegetation usually represents the most cost effective means of controlling erosion of tailings surfaces. The relative effectiveness however also depends on climatic factors and the level of maintenance provided or required. The greater the water deficit, the more difficult it becomes to maintain vegetation on tailings dams and in arid climates it may not be viable to do so.

Sustainable methods using vegetation can only be established by trial and error on a site specific basis. No simple formula exists for all situations but where experience has been built up notable success has been achieved (see also Chapter 10).

Erosion can also be initiated by concentrations of stormwater and by overtopping of impoundments. The geometric form of tailings dams must thus be planned to control erosion during the operational and post closure phases. In this regard special attention should be given to the design of the following components of a typical impoundment :

- benches or berms and perimeter dykes
- penstocks and spillways to discharge excess water

- catchment paddocks which arrest the flow of stormwater and facilitate settling out of suspended solids
- water dams which impound contaminated runoff and facilitate settling out of suspended solids
- trenches, berms and structures which divert stormwater arising upslope of the impoundment away and around the tailings dam.

The choice of design recurrence interval for each of these elements will depend on the circumstances. Risk and consequences of failure must be weighted in making the choice. The desirable risk of post closure failures may be set much lower than during the operational phase since the consequences may be more severe and because the impoundment operator will no longer be present to undertake the necessary remedial work.

The influence of siltation on long term integrity must also be considered in designs especially for closure. Siltation may cause blockage of benches, of drainage pipes, open channels or dams. Overtopping and the associated erosion may thus occur for a lower recurrence interval event than anticipated. Where siltation is unavoidable, adequate capacity and freeboard should be provided to cater for the accumulation of silt over the design life of the ameliorative measures. If this is not possible, ongoing post-closure maintenance will be required.

5.4.3. Érosion par le vent

L'érosion due au vent est fonction du climat, de l'érodabilité des stériles (fonction de la cohésion), de la végétation, de la longueur et de la raideur des talus. Les facteurs la régissant sont donnés dans « Wind Soil Loss Equation » (Israelsson et al 1980). L'érosion par le vent peut être maîtrisée de la même manière que l'érosion due à l'eau. Les mesures prises pour éviter cette dernière permettent généralement de traiter le problème de l'érosion par le vent.

5.4.4. Effets du gel et de la glace

Les effets du gel et de la glace sur les stériles et les ouvrages de retenue peuvent être importants et avoir des conséquences sur la stabilité à long terme. Ces effets sont généralement divisés en deux groupes :

- l'accumulation de glace,
- l'action saisonnière du gel.

Dans les zones où les hivers sont rigoureux avec un permafrost continu ou discontinu, l'accumulation de glace doit être prise en compte. Pendant le dépôt des stériles sur les plages, des couches de matériau gelé peuvent se former. Leur épaisseur est fonction du climat et de la vitesse de montée de la retenue. Elle peut atteindre plusieurs mètres. Les couches de stériles formant un isolant thermique, il en résulte un dépôt constitué de couches successives gelées et non gelées. Les couches gelées empêchent le drainage et, par suite, la dissipation des pressions interstitielles et la consolidation des stériles. Il peut en résulter une modification de la stabilité du barrage. Le dégel peut provoquer une consolidation différée pouvant conduire à des fissures par déformation.

5.4.5. Altération

Le phénomène d'altération est causé par des processus physiques et chimiques. L'altération physique inclut des actions telles que la fissuration et l'éclatement. Elles sont souvent provoquées par le gel-dégel, le séchage-mouillage et les variations de température. Les dégradations résultant de la végétation et de la pénétration de racines font aussi partie de l'altération physique.

L'altération chimique dépend de la minéralogie des matériaux, de la présence d'oxygène, des acides organiques et de l'eau. Les processus chimiques les plus courants sont la dissolution et les réactions acides, l'oxydo-réduction, l'hydratation et l'hydrolyse.

Les matériaux naturels tels que les sols et les roches présentent souvent une meilleure résistance vis-à-vis de l'altération que les matériaux artificiels. Les fines particules de roches broyées constituant les stériles peuvent, selon le type de roche, être rapidement altérables.

Les matériaux artificiels, tels que le béton, le bitume, les plastiques, etc..., ont une durée de vie relativement courte (le plus souvent inférieure à 100 ans) et ne doivent pas être utilisés dans les ouvrages nécessitant une stabilité à long terme supérieure à leur durée de vie.

5.4.3. Wind erosion

Wind erosion is a function of climate, erodability of tailings (cohesion properties), vegetation, length and steepness of slopes. Factors controlling it are set out in the Wind Soil Loss Equation (Israelsson et al. 1980). Wind erosion can be controlled in much the same way as water erosion, hence measures against water erosion will generally also serve the purpose of controlling wind erosion.

5.4.4. Effects of frost and ice

The effects of frost and ice on tailings and their containment structures can be large and have an influence on the long-term stability. Normally the effects can be divided into two groups :

- Ice accumulation
- Seasonal frost action.

In areas of severe winter cold where continuous or discontinuous permafrost develops, ice accumulation should be taken into consideration. During placement of tailings onto beaches, layers of frozen material may be formed. The thickness of these layers depends on the climate and the rate of the use of the impoundment. They may be many metres thick. Tailings layers serve as a thermal insulation resulting in a deposit consisting of successive frozen and unfrozen layers. The frozen layers prevent drainage and hence the dissipation of pore pressures and the consolidation of the tailings. As a result the stability of the dam may be affected. Thawing can also result in further consolidation which may result in strain induced cracking.

5.4.5. Weathering

Weathering is brought about by physical and chemical processes. Physical processes include such phenomena as slaking, cracking and spalling. They are caused by freezing-thawing, successive wetting and drying and by thermal variations. Degradation brought about by vegetation and root penetration can also be classified as physical weathering.

Chemical weathering depends on mineralogy of the materials, availability of oxygen, organic acids and water. Common chemical processes are dissolution and acidic reactions, oxidation-reduction, hydration and hydrolysis.

Natural materials such as soils and rocks are often more resistant to weathering than artificial materials. The finely ground rock particles that comprise tailings may, depending on the type of rock, be susceptible to rapid weathering.

Artificial materials such as concrete, asphalt, plastic, etc., have relatively short lifetimes (mostly less than 100 years) and should not be used where long-term stability in excess of the design life of these materials is required.

5.4.6. Dégradations dues à l'activité humaine

Des dommages et une diminution de l'intégrité de l'ouvrage peuvent être provoqués par divers agents. L'utilisation de la surface de la retenue de stériles, comme espace de loisirs ou autre, peut endommager les structures spécialement mises en place pour assurer la stabilité à long terme. Aussi, les terrains utilisés après la fermeture de l'exploitation et du dépôt doivent-ils être contrôlés si l'on veut assurer la sécurité à long terme.

La végétation (qui joue un rôle stabilisateur important pour les talus, comme pour les surfaces horizontales) peut facilement être détruite ou son efficacité diminuée par une mauvaise utilisation du terrain. Généralement, la réhabilitation de la retenue de stériles en terre agricole ou aire de jeux doit être gérée avec plus de précautions qu'on ne le fait habituellement pour éviter une détérioration de la végétation par les animaux, le feu, etc... qui peuvent provoquer une dégradation et une mise à nu du sol.

5.4.7. Variations climatiques et altération des sols de surface

La végétation recouvrant la surface des retenues de stériles et destinée à maîtriser l'érosion est souvent plus sensible et moins résistante aux variations climatiques extrêmes qu'habituellement en raison de la nature relativement hostile du sol sur lequel elle se développe. Aussi, ne peut-elle supporter que des conditions climatiques normales, et requiert un entretien particulier en cas de forte sécheresse, de froid ou de chaleur exceptionnels, et de feux.

Les stériles constituent rarement un support idéal pour la végétation et sont souvent peu propices au développement de la végétation. Dans de nombreux cas, la salinité et la toxicité sont des obstacles à une végétalisation de qualité, et, dans ce cas, un traitement des stériles en surface peut être nécessaire (voir chapitre 10).

Une dégradation à long terme du sol peut se produire lorsque les sels remontent vers la surface par percolation et/ou capillarité, entraînant leur accumulation et, éventuellement, la destruction de la végétation. Ces phénomènes sont souvent associés à des stériles fins, mais peuvent également se produire dans les cas où le sol se fissure ou s'altère chimiquement libérant ainsi des sels et des métaux.

5.5. STABILITÉ AU CISAILLEMENT

On doit remarquer que la stabilité au cisaillement des barrages de stériles n'a pas d'effet direct sur l'environnement, mais plutôt des effets indirects si le barrage se rompt. La conception des talus extérieurs des barrages de stériles est abordée dans le Bulletin n° 45 de la CIGB, même si ce document traite plutôt de la conception des ouvrages en vallée et en climat tempéré.

Les facteurs affectant la stabilité au cisaillement sont résumés ci-dessous :

- le procédé retenu pour la mise en dépôt, par exemple sous l'eau ou semi-aérien,
- les caractéristiques géotechniques des stériles déposés, qui incluent également celles résultant des méthodes de dépôt et d'exploitation,

5.4.6. Anthropogenic damage

Damage and loss of integrity may be brought about by a variety of agents. Use of tailings dam surfaces for recreational and other purposes which may damage structures specially created to provide for long-term stability should be controlled. Post closure land use must thus be controlled if long-term stability is to be maintained.

Vegetation (which plays a vital role in stabilising both sloping and horizontal surfaces) can readily be destroyed, or its efficacy be impaired by inappropriate land use. Generally, farming and game conservation on rehabilitated tailings impoundments must be managed more carefully than usual in order to prevent overgrazing, grass fires, etc., which could result in denudation and degradation.

5.4.7. Climate variability and substrata deterioration

Vegetation which is established on the surfaces of tailings impoundments in order to control erosion is often more sensitive and less resistant to extreme climate variation than usual owing to the relatively harsh substrata on which the vegetation is established. Vegetation may thus only be sustainable for normal conditions and may require special maintenance after extreme droughts, exceptionally cold or hot weather and fires.

Tailings seldom form ideal substrata to support vegetation and are often hostile to plant life. Salinity and toxicity are obstacles to establishment of vigorous vegetation cover in many instances and here substrata conditioning may be required (see Chapter 10).

Long term deterioration of substrata may occur where seepage and/or capillary actions draw salts up to the surface and cause a buildup which eventually kills off vegetation. These conditions are usually associated with finer grained tailings but may also be prevalent where the substrate breaks down or weathers chemically and in so doing liberates salts and metals.

5.5. SHEAR STABILITY

It must be emphasized that the shear stability of a tailings dam does not impinge directly on the environment, but may do so indirectly if the dam fails in shear. The design of the outer slopes of tailings impoundments is covered in ICOLD Bulletin 45, although this document is biased towards the design of valley impoundments and conditions in cool temperate climates.

Factors affecting the shear stability may, however, be summarized as follows:

- The management system used to construct the dam, e.g. by subaqueous or subaerial deposition;
- the geotechnical characteristics of the deposited tailings, which include characteristics that arise from the methods of deposition and operation;

- les ouvrages mis en place dans les talus extérieurs, c'est-à-dire les systèmes de drainage et les éventuels revêtements...,
- la vitesse de montée des stériles (qui contrôle les surpressions interstitielles et doit être adaptée aux autres dispositions du projet, telles que la présence ou l'absence d'un drainage de base),
- la présence ou l'absence d'activité sismique,
- une estimation de l'érosion à court terme et à long terme des talus, et des moyens à mettre en œuvre pour y remédier,
- l'utilisation finale du dépôt et les plans de réhabilitation.

Des précautions spéciales doivent être prises si le barrage est situé dans une zone sismique active. Le lecteur pourra se référer au Bulletin 98 de la CIGB « Barrages de stériles et sismicité » (1995).

Dans le cas de stériles grossiers, non plastiques, et si la retenue de stériles est correctement gérée comme indiqué par ailleurs dans ce document, les conditions suivantes doivent être remplies à tout moment de l'exploitation :

- les stériles doivent être entièrement consolidés, probablement même surconsolidés par dessiccation, et denses,
- la ligne de saturation doit être basse et, idéalement, au niveau de la base du barrage,
- la recharge extérieure doit être constituée par des levées formées de matériaux compacts obtenus par compactage ou par drainage et dessiccation,
- dans le cas d'ouvrages construits suivant la méthode de l'axe central ou la méthode amont, la transition entre le talus aval et les matériaux de la retenue doit être progressive, ce qui permet d'obtenir une recharge aval importante construite de matériaux compacts, bien consolidés et drainés.

Dans le cas de stériles fins, plastiques et peu drainants, la formation des pressions interstitielles résultant de la mise en dépôt peut être sérieusement sous-estimée si l'on se base sur la théorie classique de la consolidation sous faibles déformations (Terzaghi). La théorie de la consolidation sous fortes déformations doit être utilisée pour estimer valablement les pressions interstitielles.

Les points à considérer concernant la stabilité des barrages de stériles sont :

- la nécessité d'étudier le barrage à divers stades de hauteur, aussi bien que pour sa hauteur finale,
- si les stériles sont denses et surconsolidés, ils auront un comportement dilatant. S'ils sont normalement ou légèrement surconsolidés, ils auront un comportement contractant, et pourront perdre de leur résistance s'ils sont soumis à d'importantes déformations de cisaillement.
- si les stériles sont contractants, leur stabilité doit être étudiée sur la base de leur résistance au cisaillement consolidée non drainée, en incluant, lorsque cela est approprié, les pressions interstitielles estimées à partir de la théorie de la consolidation sous forte déformation,
- si les stériles sont dilatants, leur stabilité doit être étudiée sur la base de leur résistance au cisaillement consolidée drainée.

- features built into the outer slopes, e.g. underdrainage systems, possible underlining systems, etc.;
- the rate of rise of the tailings (which controls excess pore water pressures and should be appropriate for other features of the design, e.g. the presence or absence of under-drainage);
- the presence or absence of seismic activity;
- an assessment of short and long-term erosion from the slopes and measures for combatting these;
- the proposed end use for the completed tailings impoundment and plans for its rehabilitation.

If the dam is located in a seismically active area, special precautions need to be taken, and the reader is referred to ICOLD Bulletin 98 “Tailings Dams and Seismicity” (1995).

In the case of coarse, non-plastic tailings, if the tailings impoundment is correctly operated, as outlined elsewhere in this document, the deposited tailings should, at all stages of its operational life, be :

- completely consolidated, possibly even overconsolidated by sundrying, and dense;
- the phreatic surface should be low, and ideally at the level of the base of the dam;
- the outer wall should consist of a substantial wedge of dense material that has either been densified by compaction or by drainage and sun-drying;
- in the case of centre-line or upstream embankments, the transition from outer shell to contained material should be gradual, again providing a substantial outer wedge of dense, well consolidated and drained material.

In the case of fine plastic tailings that do not readily drain, generation of pore water pressures by deposition may be seriously underestimated if Terzaghi's conventional small strain consolidation theory is used. Large strain consolidation theory must be used to estimate pore pressures accurately.

Points to be considered in assessing the shear stability of tailings dam are :

- It may be necessary to analyse the dam at several stages of its development, as well as at full height.
- If the tailings will be over-consolidated and dense, they will be dilatant. If the tailings will be normally or slightly overconsolidated, they will be contractant, and may lose strength when subjected to large shear strains.
- If the tailings will be contractant, the stability analysis should use the consolidated undrained shear strength of the tailings, including, when appropriate, pore water pressures estimated by large strain consolidation theory.
- If the deposited tailings will be dilatant, the stability analysis should be based on the consolidated drained shear strength of the tailings.

Une vérification périodique de la stabilité au cisaillement doit être effectuée pour confirmer que :

- les modes de mise en dépôt et d'exploitation proposés sont réalisables en pratique et effectivement réalisés,
- le mode d'exploitation maintient la dimension initialement prévue pour la retenue et qu'elle reste correctement positionnée vis-à-vis de l'entrée de l'ouvrage de décantation, et qu'en conséquence le niveau de la ligne de saturation est tel que prévu,
- l'état actuel est conforme à celui prévu au projet, et que la vitesse de montée du dépôt est également conforme à celle prévue,
- les propriétés des stériles, le niveau de la ligne de saturation, etc... sont ceux prévus initialement au projet,
- les talus extérieurs du barrage sont construits conformément aux pentes définies au projet.

Les conséquences résultant de tout écart par rapport au projet initial doivent être évaluées, et, si nécessaire, le projet sera modifié en conséquence.

Periodic reviews of shear stability should be carried out to confirm the following :

- that the proposed method of deposition and operation are feasible in practice and are being realized;
- that the method of operation is maintaining the anticipated size of pool that is correctly located around the decant inlet; therefore that the phreatic surface should be as anticipated;

- that the actual stage curves are in agreement with those forecast in design, and that the rate of rise of the tailings is as forecast;
- that the properties of the deposited tailings, the position of the phreatic surface, etc. are as planned;
- that the outer slopes of the dam are being constructed to the correct slope.

The effect of any deviation from the predicted conditions must be assessed and the design, if necessary, modified accordingly.

6. STABILITÉ À LONG TERME VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT

6.1. INTRODUCTION

A la suite de l'arrêt de l'exploitation du dépôt de stériles, il est primordial de prendre des mesures appropriées permettant de minimiser les risques de contamination de l'environnement, et assurant une stabilité à long terme. Diverses méthodes, visant ces objectifs, sont disponibles; elles diffèrent selon le climat, les conditions de site, la nature des stériles, le type de barrage et les réglementations.

La fermeture d'un dépôt de stériles est plus facile lorsqu'il a été tenu compte, pendant son exploitation, des conditions requises pour sa fermeture. Quelques aspects du projet de fermeture pour des dépôts mis hors d'eau ou sous l'eau sont commentés et illustrés ci-après.

6.2. DÉPÔTS SOUS L'EAU

Lorsque les conditions climatiques et topographiques le permettent, on peut envisager d'abandonner le dépôt avec une lame d'eau permanente sur la surface des stériles. Ceci crée un dispositif permanent empêchant le passage de l'oxygène dans les matériaux déposés et permettant ainsi l'arrêt du processus d'altération conduisant à la formation de produits acides (voir chapitre 5). Pour apprécier la stabilité à long terme, on doit examiner les points suivants :

- un dépôt sous l'eau doit présenter un bassin versant suffisant pour garantir une submersion permanente des stériles. Aussi est-il souvent nécessaire d'implanter le dépôt dans une vallée.
- la stabilité du barrage de stériles doit être assurée avec un coefficient de sécurité satisfaisant.
- le barrage doit être conçu pour résister aux événements extrêmes tels que la crue maximale probable (PMF), le séisme maximal possible et l'action de fortes vagues.
- le barrage doit être conçu pour empêcher les dégradations à long terme induites par l'érosion, la glace, le gel ou toute autre forme d'altération. Dans la mesure du possible, on doit utiliser, en remblai, des sols ou des enrochements présentant une résistance à long terme à l'altération.
- la ligne de saturation dans le barrage doit être contrôlée par un drainage adéquat pour assurer une dissipation correcte des pressions interstitielles.

Les événements les plus probables pouvant entraîner une rupture du barrage pendant la phase à long terme sont la submersion à la suite de crues excep-

6. ENVIRONMENTAL STABILITY DURING THE LONG-TERM PHASE

6.1. INTRODUCTION

Following cessation of deposition on a tailings deposit it is essential to take appropriate action to minimise the risks of environmental contamination and to ensure long-term stability. Various design methods to achieve these objectives are available, which differ according to climate, site conditions, nature of the tailings, type of impoundment and regulation requirements.

Effective closure of a tailings deposit is more easily achieved if cognizance of closure requirements has been taken during the operating life of the facility. Some closure design aspects for both under water and dewatered deposits are discussed and illustrated below.

6.2. UNDER WATER DEPOSITS

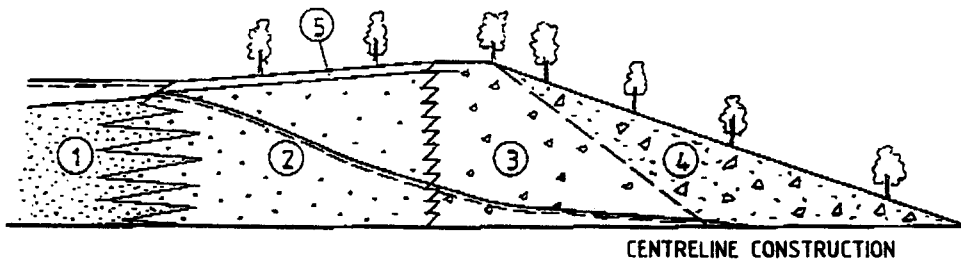
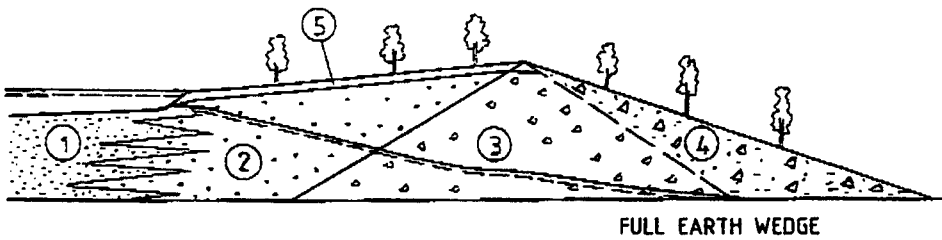
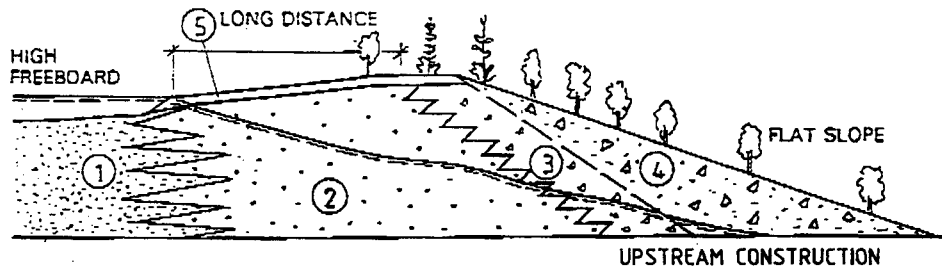
Where climatic and topographical conditions are suitable, consideration should be given to permanently flooding the surface of the closed tailings deposit with water. This will create an effective long-term seal against the ingress of oxygen into the deposit and hence inhibit the weathering process that may lead to the formation of acid (see Chapter 5). The long-term stability of a flooded deposit will require consideration of the following :

- an under water deposit must have an adequate catchment area to guarantee a permanent water cover of the tailings. For this reason it will probably be necessary to locate the deposit in a valley.
- the stability of the tailings embankments must be assured such that the probability of slope failure is reduced to an acceptable level.
- the dam should be designed to withstand extreme events such as Probable Maximum Flood (PMF), Maximum Credible Earthquake and high wave actions.
- the dam should be designed to prevent long-term deterioration induced by erosion, ice and frost forces as well as other weathering. Where feasible soil and rock materials possessing favourable long-term resistance to weathering should be used to support fill.
- the phreatic surfaces within the dam should be controlled by adequate drainage to ensure dissipation of excess pore water pressures.

The most likely events that can induce failure of a tailings dam designed for the long-term phase are overtopping by extreme floods, or as a result of gradual

tionnelles ou résultant d'une perte graduelle de la revanche par alluvionnement, ou une rupture par érosion interne. La probabilité de submersion dépend de la hauteur de la revanche et de la capacité de l'évacuateur de crue. Une revanche maximale doit être réalisée par un rehaussement de la crête du barrage à l'aide de moyens mécaniques et en maintenant dans la retenue un niveau d'eau aussi bas que possible. L'évacuateur de crue doit être dimensionné pour la crue maximale probable (PMF).

Comme conséquence d'une revanche adéquate, la distance entre la crête du barrage et le bord de la retenue sera importante pendant les conditions climatiques normales. La surface de stériles correspondante doit être recouverte d'une couche étanche pour éviter les infiltrations, le contact avec l'air et l'altération concomitante. Les avantages d'une plage de grande largeur sont une amélioration de la stabilité des talus et une diminution du risque d'érosion interne du fait d'une ligne de saturation et de lignes de courant faiblement inclinées.



loss of freeboard by siltation, or a failure induced by internal erosion. The probability of overtopping is controlled by the height of the freeboard and the capacity of the spillway. Maximum freeboard should be created by mechanically raising the dam crest and maintaining a low water level in the pond. The capacity of the spillway should be designed for the PMF.

As a consequence of ensuring adequate freeboard there is likely to be a considerable distance from the edge of the pond under normal climatic conditions to the crest of the dam. This area of tailings should be covered with an impervious layer of material to prevent infiltration, aeration and concomitant weathering. The advantages of the long beach distance are that slope stability is improved and the potential for internal erosion is reduced as a consequence of the flat phreatic surface and flow lines.

Fig. 2

Dams for under water deposits
Barrages pour dépôts sous l'eau

Upstream construction
 High freeboard
 Long distance
 Flat slope
 Full earth wedge
 Centreline construction

Construction par la méthode amont
Revanche importante
Distance importante
Pente faible
Construction par la méthode aval
Construction par la méthode de l'axe central

- ① Fine tailings
- ② Coarse tailings
- ③ Support fill
- ④ Support fill, long-term stable
- ⑤ Impervious cover and erosion protection

- ① *Stériles fins*
- ② *Stériles grossiers*
- ③ *Recharge*
- ④ *Recharge, stable à long terme*
- ⑤ *Revêtement imperméable et protection contre l'érosion*

La conception à long terme des dépôts de stériles est un concept récent et on dispose de peu d'expérience sur leur comportement à long terme. Basés sur les remarques et recommandations données par ailleurs dans ce document, quelques exemples types de dépôts sous l'eau sont donnés sur la Fig. 2. On a supposé que le barrage a été construit par les méthodes classiques pendant sa phase d'exploitation et que sa réhabilitation assure sa stabilité à long terme.

Dans tous les cas, le barrage présente une revanche importante, un talus aval de faible pente, une grande distance jusqu'à la retenue et une ligne de saturation faiblement inclinée. Toutes les surfaces à l'air libre sont recouvertes par des matériaux stables à long terme, empêchant les infiltrations et la diffusion dans les stériles réactifs sous-jacents. Le barrage doit être clôturé et revégétalisé, afin de se fondre dans le paysage.

Quelques exemples types de dépôts mis hors d'eau sont donnés sur la Fig. 3. Dans le même esprit que la Fig. 2, il a été supposé que l'ouvrage a été construit suivant les méthodes classiques pendant sa phase d'exploitation et modifié à sa fermeture afin de remplir les exigences requises pour sa stabilité à long terme.

6.3. DÉPÔTS MIS HORS D'EAU

Il est reconnu que la stabilité à long terme d'un dépôt mis hors d'eau est plus facile à obtenir que celle d'un dépôt sous l'eau. L'abaissement de la ligne de saturation augmente la stabilité des talus et diminue le risque d'érosion interne. Toutefois, certains aspects essentiels doivent être pris en compte pour l'abandon du dépôt afin d'atteindre les objectifs définis précédemment. Ce sont :

- les talus externes du dépôt doivent être modifiés afin d'obtenir un coefficient de sécurité satisfaisant à long terme et vis-à-vis des séismes,
- les percolations provenant du dépôt doivent être contrôlées au moyen d'un drainage approprié,
- la revanche doit permettre d'éviter la submersion dans le cas de la crue maximale probable,
- le dépôt doit pouvoir résister à la détérioration lente due à l'érosion, aux effets de la glace et du gel et à l'altération. La recharge doit être constituée de sols ou de matériaux rocheux naturels résistant à ces actions,
- lorsque l'altération des stériles a tendance à former des produits acides, le dépôt doit être recouvert d'une couche de sol appropriée empêchant les infiltrations et la diffusion.

S'il n'est pas possible ou autorisé d'évacuer l'eau d'un dépôt mis hors d'eau, des dispositions appropriées doivent être prises pour évaporer l'eau collectée sur sa surface ou l'évacuer en pied de barrage. Les ouvrages existants de dérivation des eaux de ruissellement doivent être améliorés afin d'augmenter leur capacité et leur résistance dans le temps pour éviter l'érosion du dépôt sous de fortes pluies. Les tours de décantation et les conduites d'évacuation doivent être laissées dans un état qui ne constitue pas un risque à long terme, ce qui est obtenu en les bouchant avec

Long-term design of tailings deposits is a relative recent concept and there is little experience of long-term behaviour of tailings dams. Based on considerations and recommendations given elsewhere in this document, some idealised examples of permanent under water deposits have been developed as shown on Fig. 2. It has been assumed that the dams have been constructed by conventional methods during the operating phase and that the rehabilitation will ensure the long-term stability of the deposit.

It should be noted that in all cases the dams have a high freeboard, a flat downstream slope, a long distance to the edge of the pond and a flat phreatic surface. All exposed surfaces are covered by materials having adequate long-term stability characteristics in order to prevent infiltration and diffusion of underlying reactive tailings. The dams should be contoured and re-vegetated to blend in with the surrounding landscape.

Some typical examples of dewatered deposits are given in Fig. 3. Consistent with the examples given in Fig. 2, the illustrated deposits have been assumed to have been constructed according to conventional methods during the operating phase and modified on closure to fulfil long-term safety requirements.

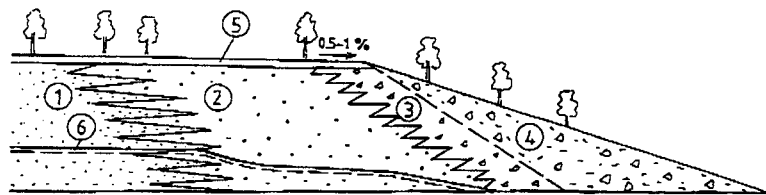
6.3. DEWATERED DEPOSITS

It is likely that the long-term stability of a dewatered deposit will be more easily achieved than in the case of an under water deposit. The lowering of the phreatic surface will increase slope stability and reduce the risk of internal erosion. There are, however, several essential aspects that need to be considered on closure of the deposit to ensure that the objectives given above are achieved, viz :

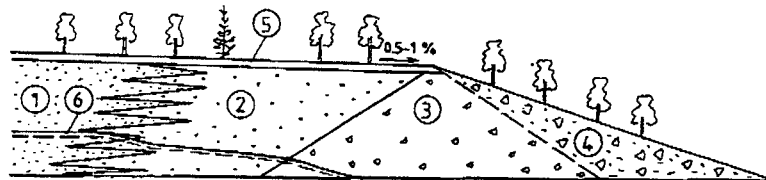
- the outer slopes of the deposit should be modified to ensure an adequate factor of safety for both long-term stability and seismic loading conditions
- seepage emanating from the face of the deposit should be adequately controlled by appropriate drainage facilities
- the deposit should have adequate freeboard to prevent overtopping in the event of the PMF
- the deposit should be permanently stable against slow deterioration actions arising from erosion, ice and frost forces and weathering. Natural soil and rock materials with inherent resistance to the above should be used as support fill
- where weathering of the tailings possesses a propensity to produce acid, the deposit should be covered with a suitable layer of soil to inhibit infiltration and diffusion.

If it not possible or permissible to discharge water from the dewatered deposit, adequate provision should be made to evaporate all water that collects on the upper surface or discharges from the toe of the facility. Existing systems of stormwater diversion structures should be upgraded to improve capacity and durability and so prevent erosion of the deposit in the event of high rainfall. Decant towers and outfall pipes should be left in a state that they do not constitute of potential long-term risk. This is best achieved by sealing the outfall pipe with a

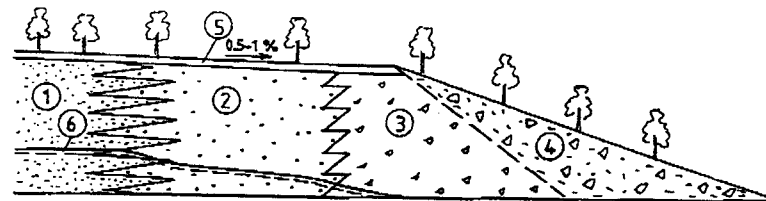
un coulis de ciment. La surface du dépôt doit être clôturée par un « remblai » périphérique afin d'obtenir un équilibre acceptable entre les précipitations et l'évaporation. Dans les régions de forte pluviométrie, un évacuateur de crue peut se révéler nécessaire pour évacuer l'excédent d'eau tombant sur la surface de l'ouvrage.



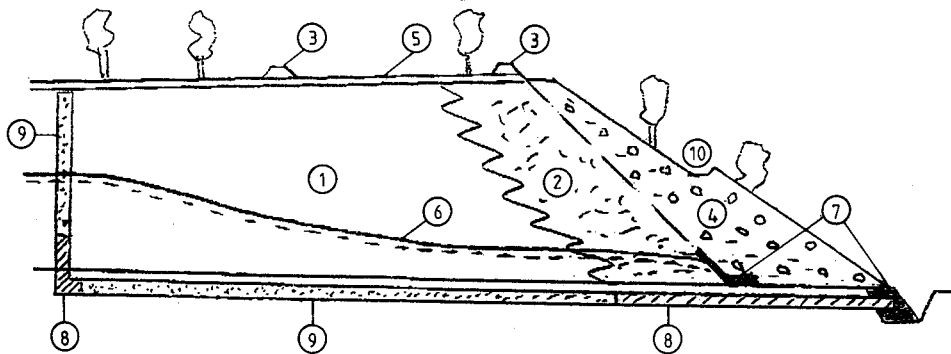
a) UPSTREAM CONSTRUCTION



b) FULL WEDGE (DOWNSTREAM) CONSTRUCTION



c) CENTRELINE CONSTRUCTION



d) POSSIBLE ALTERNATIVE ARRANGEMENT IN ARID CLIMATES

cementitious grout plug. The upper surface of the dam should be contoured to ensure an acceptable balance between precipitation and evaporation. In high rainfall areas a suitable spillway may be required to decant excess water off the surface of the dam.

Fig. 3

Typical dams for dewatered deposits
Barrages types pour dépôts mis hors d'eau

- | | |
|--|---|
| a) Upstream construction | a) <i>Construction par la méthode amont</i> |
| b) Full wedge (downstream) construction | b) <i>Construction par la méthode aval</i> |
| c) Centreline construction | c) <i>Construction par la méthode de l'axe central</i> |
| d) Possible alternative arrangement in arid climates | d) <i>Autre méthode de construction dans les climats arides</i> |
| ① Fine tailings | ① <i>Stériles fins</i> |
| ② Coarse tailings | ② <i>Stériles grossiers</i> |
| ③ Support fill (or tailings) | ③ <i>Recharge (ou stériles)</i> |
| ④ Support fill, long-term stable | ④ <i>Recharge, stable à long terme</i> |
| ⑤ Impervious cover and erosion protection | ⑤ <i>Revêtement imperméable et protection contre l'érosion</i> |
| ⑥ Phreatic line | ⑥ <i>Ligne de saturation</i> |
| ⑦ Filter drain | ⑦ <i>Drain filtrant</i> |
| ⑧ Grout plug to decant tower | ⑧ <i>Ouvrage de décantation obturé avec du coulis de ciment</i> |
| ⑨ Tailings fill to decant tower | ⑨ <i>Ouvrage de décantation comblé par des stériles</i> |
| ⑩ Stormwater control berm | ⑩ <i>Risberme de contrôle des eaux de ruissellement</i> |

7. EFFETS NÉFASTES DES PRODUITS CHIMIQUES RÉSIDUELS, DE L'ALTÉRATION ET DE LA RADIOACTIVITÉ SUR L'ENVIRONNEMENT

Tous les stériles ou matériaux similaires ont subi des processus de séparation physiques ou physico-chimiques (flottation), ou des réactions chimiques (par exemple la « cyanuration »), ou sont des produits de réactions chimiques (par exemple, la digestion acide ou la combustion). Aussi, le fluide interstitiel peut-il contenir des produits chimiques résiduels ou des résidus solubles qui sont potentiellement ou réellement dangereux pour l'environnement. Quelques exemples de produits chimiques résiduels sont donnés ci-après :

- la soude issue de l'extraction de la bauxite,
- le cyanure issu de l'extraction de l'or,
- les agents moussants organiques provenant du processus de flottation,
- l'acide phosphorique provenant des industries de production d'engrais.

Dans les régions arides, l'eau d'alimentation des processus de traitement est souvent saline. La circulation de cette eau salée provoque un accroissement de sa salinité par suite de l'évaporation, principalement sur les dépôts de stériles et dans les bassins de récupération d'eau. La salinité peut atteindre un taux inacceptable pour l'environnement.

Les stériles contiennent aussi des métaux résiduels qui, soit n'ont pas été récupérés lors de leur extraction, soit constituent des métaux associés non récupérables. Quelques-uns, et, plus particulièrement, ceux contenant du sulfure, tendent à s'oxyder avec le temps, en produisant des acides et des sels solubles de métaux lourds (par exemple, arsenic ou plomb). Les métaux résiduels peuvent également être radioactifs et constituer une menace pour l'environnement si les stériles correspondants sont disséminés par l'érosion par l'eau ou le vent.

La pollution chimique potentielle des stériles est un sujet extrêmement vaste qui ne peut être entièrement traité ici. Toutefois, trois des phénomènes les plus courants sont abordés ci-après. Ce sont la radioactivité, la présence de cyanure résiduel et la création et le contrôle de produits de drainage acides.

Le Tableau suivant constitue un guide des concentrations maximales acceptables de constituants dissous dans les effluents des barrages de stériles et autres dépôts de déchets. Ces taux sont issus d'un certain nombre de données mondiales; toutefois, les réglementations particulières à chaque pays peuvent être plus ou moins contraignantes.

7. ENVIRONMENTAL EFFECTS OF REMNANT PROCESS CHEMICALS, WEATHERING AND RADIOACTIVITY

All tailings and tailings-like materials have been subjected to physical or physico-chemical separation processes (e.g. flotation), or chemical solution processes (e.g. cyanidation), or have been formed by a chemical process (e.g. acid digestion or combustion). The pore fluid of the tailings may therefore contain remnant process chemicals or water soluble residues that present a potential or actual environmental danger. Examples of remnant process chemicals are :

- caustic from the extraction of bauxite
- cyanide from the extraction of gold
- organic foaming agents from flotation processes, and
- phosphoric acid from fertilizer manufacture.

In arid regions the water intake to a process is often saline. Circulation of the saline water causes a concentration of salinity as a result of evaporation, mainly on tailings dams and in return water dams. The salinity may rise sufficiently to be a potential environmental danger.

Tailings will also contain remnant minerals that have escaped recovery, or associated minerals that have not been recovered. Some of these, particularly sulphide minerals, will tend to oxidise with time, possibly releasing acids and soluble salts of heavy metals (e.g. arsenic or lead). Remnant minerals may also be radio-active and constitute an environmental threat if their host tailings are disseminated by wind or water erosion.

The chemical pollution potential of tailings is an extensive subject, and cannot be fully dealt with in this document. However, three of the more commonly occurring phenomena will be elaborated further. These are radioactivity, remnant cyanide and the formation and control of acid drainage.

The following Table is given as a guide to acceptable upper limits to dissolved constituents in effluent from tailings dams and other waste disposal operations. The data in the Table has been drawn from a number of sources world-wide, and standards in a particular country may be more or less stringent than the limits shown here.

Constituant	Concentration maximale type admissible (mg/l)
Ammoniaque (libre & sels), dosé en N	10
Arsenic, dosé en As	0,1
Baryum, dosé en Ba	1,0
Bore, dosé en B	1,0
Cadmium, dosé en Cd	0,05
Chlore	250
Chlore, dosé en Cl	0,1
Chrome (total), dosé en Cr	0,1
Chrome (hexavalent), dosé en Cr	0,05
Cuivre, dosé en Cu	1,0
Cyanure, dosé en Cn	0,1
Fluor, dosé en F	1,0
Fer, dosé en Fe	0,3
Plomb, dosé en Pb	0,1
Manganèse, dosé en Mn	0,1
Mercure, dosé en Hg	0,01
Nitrate, dosé en N	10
Sélénium, dosé en Se	0,01
Argent, dosé en Ag	0,05
Sulfate	250
Sulfure, dosé en S	1,0
Zinc, dosé en Zn	5

Outre ces limites sur des produits donnés, les conditions plus générales ci-dessous sont à respecter :

- pH entre 6 et 9,
- demande chimique en oxygène (DCO) inférieure à 75 mg/l,
- taux de matières solides dissoutes (TDS) inférieur à 500 mg/l,
- conductivité inférieure à 500 mSm⁻¹.

7.1. RADIOACTIVITÉ

De nombreux minerais contiennent des métaux radioactifs. Le minerai peut être exploité pour ses constituants radioactifs (par exemple l'uranium), ou, pour des raisons commerciales, les éléments radioactifs ne sont pas récupérés. Dans les deux cas, les stériles sont radioactifs, et leur taux de radioactivité dépend de leur concentration en métaux radioactifs.

L'uranium est le métal radioactif le plus couramment rencontré dans les stériles radioactifs; ceux-ci contiennent également des radio-nucléides dérivés de l'uranium présentant une durée de vie importante, tels que :

- le thorium 230 avec une période de 80 000 ans,
- le radium 226 avec une période de 1 620 ans.

Constituent	Typical Maximum Permissible concentration (mg/l)
Ammonia (free & saline), as N	10
Arsenic, as As	0,1
Barium, as Ba	1,0
Boron, as B	1,0
Cadmium, as Cd	0,05
Chlorine	250
Chlorine, as Cl	0,1
Chromium (total) as Cr	0,1
Chromium (hexavalent), as Cr	0,05
Copper, as Cu	1,0
Cyanides, as Cn	0,1
Fluorine, as F	1,0
Iron, as Fe	0,3
Lead, as Pb	0,1
Manganese, as Mn	0,1
Mercury, as Hg	0,01
Nitrate, as N	10
Selenium, as Se	0,01
Silver, as Ag	0,05
Sulphate	250
Sulphide, as S	1,0
Zinc, as Zn	5

In addition to these limits on specific chemical species, the following more general requirements are also typically required to be met :

- pH within the range of 6 to 9,
- Chemical Oxygen Demand (COD) not to exceed 75 mg/l,
- Total Dissolved Solids (TDS) not to exceed 500 mg/l, or
- Conductivity not to exceed 500 mSm⁻¹.

7.1. RADIOACTIVITY

Many ores contain radio-active minerals. The ore may be mined for the recovery of the radio-active constituent (e.g. uranium), or, for commercial reasons, there may be no attempt to recover the radio-active mineral. In either case, the tailings will be radio-active, the level of radioactivity depending on the concentration of radio-active minerals present.

Uranium is the most common naturally occurring radio-active mineral, and tailings containing uranium will usually contain at least traces of long-lived radio-nuclides derived from uranium, for example

- Thorium 230 with a half life of 80 000 years,
- Radium 226 with a half life of 1 620 years.

Ces éléments sont à leur tour accompagnés par leurs produits radioactifs de désintégration, par exemple le radon 222 (période de 3,8 jours). Le radon est particulièrement difficile à contrôler car il s'agit d'un gaz.

Ces radio-nucléides sont principalement relâchés dans l'environnement par les eaux de surface et souterraines, et avec les poussières transportées par le vent. Le radon se désintègre en Plomb 210 et Polonium 210. Ceux-ci peuvent se déposer sur des zones cultivées situées sous le vent par rapport au barrage. Les cultures et l'air peuvent être contaminés jusqu'à une distance du barrage pouvant atteindre un kilomètre.

Il est donc important de prévoir une zone franche d'au moins un kilomètre entre un dépôt de stériles radioactifs et toute culture ou habitation.

Il est également important de protéger le dépôt contre l'érosion par l'eau ou le vent, qui peut disperser les éléments radioactifs dans l'environnement. Dans les cas les plus dangereux, il peut être nécessaire de recouvrir le dépôt de stériles par des sols ou des roches afin de contenir ou atténuer les effets de la radioactivité (voir également la couverture par des sols pour maîtriser la formation de produits acides, sujet abordé plus loin dans le Bulletin).

7.2. CYANURE RÉSIDUEL

Le cyanure est utilisé pour extraire l'or et d'autres métaux de minerais finement broyés. Le minerai est mis en présence d'une solution de cyanure avec laquelle il réagit; celle-ci est ensuite filtrée afin de récupérer les métaux dissous. Une certaine quantité de la solution de cyanure reste dans les stériles et du cyanure s'associe à des métaux contenus dans les stériles. Bien que les composés de cyanure soient instables et se volatilisent facilement, particulièrement lorsqu'ils sont exposés au soleil, la concentration de cyanure dans l'eau qui arrive au barrage de stériles est souvent supérieure au taux admissible de 0,1 mg/l.

Une étude récente de Landsdown (1992) a montré que les boues de stériles de mines d'or avaient un taux de cyanure compris entre 20 et 65 mg/kg lorsqu'elles quittaient le broyeur. Après décantation et drainage des eaux excédentaires, ce taux diminue jusqu'à 3 à 15 mg/kg. Le taux contenu dans la phase liquide des stériles reste lui entre 10 et 30 mg/l. S'il reste exposé au soleil, le cyanure contenu dans les stériles et l'eau de décantation va progressivement se volatiliser. Dans certains cas cependant, il est nécessaire de traiter l'eau de décantation pour en extraire le cyanure avant de la rejeter dans les rivières ou les lacs. Ceci peut être effectué au moyen d'un traitement microbiologique relativement bon marché.

7.3. FORMATION DE PRODUITS ACIDES ET DE SELS

De nombreux stériles miniers contiennent des sulfures sous forme de pyrite (sulfures de fer, de cuivre ou d'autres métaux). La pyrite s'oxyde en acide sulfurique, en présence d'air et d'humidité. Celui-ci réagit à son tour avec d'autres composants des stériles, tels que les carbonates de calcium et de magnésium et le

These substances will, in turn, be accompanied by their radio-active decay products, particularly radon 222 (3,8 day half life). Radon is particularly difficult to contain because it is a gas.

The main routes whereby radio-nuclides are released into the environment are via surface and groundwater flow, and via wind-borne dust. Radon decays to Lead 210 and Polonium 210. These may be deposited on crops downwind of the tailings deposit. Significant contamination of crops and the air may extend as far as 1 km from a tailings deposit.

It is therefore necessary to provide a buffer zone at least 1 km wide between a deposit of radio-active tailings and any crops or habitations.

It is also particularly necessary to prevent erosion by water or wind that may disperse radio-active particles into the environment. In severe cases, it may be necessary to cap a tailings deposit with a soil and rock cover to contain and attenuate the effects of radioactivity. (See also soil cappings used to control acid formation, later).

7.2. REMNANT CYANIDE

Cyanide is used to remove gold and other metals from finely milled ore. The ore is reacted with a cyanide solution which is then filtered out of the ore to recover the dissolved metals. A certain amount of the cyanide solution remains in the tailings and some cyanide becomes bound to other minerals that are contained by the tailings. Although cyanide compounds are unstable and volatilize readily, especially when exposed to sunlight, the concentration of cyanide in the water that reaches a tailings dam usually exceeds the permissible level in effluent water of about 0,1 mg/l.

A recent study by Landsdown (1992) has shown that the total cyanide content of a gold tailings slurry, as it leaves the mill, may lie in the range from 20 to 65 mg/kg. After allowing the tailings to settle and draining off excess water, the total cyanide content reduces to 3 to 15 mg/kg. The liquid content of the tailings, however, remains in the range of 10 to 30 mg/l. The cyanide retained in the tailings and the decant water will gradually volatilize if left exposed to sunlight. In certain cases, however, it may prove necessary to treat decant water for the removal of cyanide before it can be discharged into any public stream or lake. This can be done relatively cheaply by a microbiological process.

7.3. FORMATION OF ACID AND SALTS

Many mine tailings contain sulphur in the form of pyrite (sulphides of iron, copper and other metals). This pyrite can oxidize, in the presence of air and moisture, to form sulphuric acid. The sulphuric acid, in turn, reacts with other components of the tailings, e.g. magnesium and calcium carbonates and the iron

fer contenu dans la pyrite, pour former des sulfates de calcium, de magnésium ou de fer. A l'intérieur des stériles, le phénomène d'oxydation est très lent. Toutefois, il peut être multiplié par 5 000 ou plus en présence de bactéries participant à cette réaction, essentiellement la bactérie thiobacillus ferrooxydante, qui accélère la réaction d'oxydation des sulfures. Le phénomène d'oxydation dépend également de la température; lent à basse température, il s'accélère avec l'élévation de température. L'activité de la bactérie croît également avec la température. Les bactéries, telles que thiobacillus ferrooxydante, sont très courantes et généralement rencontrées dans la plupart des sols naturels.

Les dépôts de stériles sont très rapidement infectés par cette bactérie, qu'ils contiennent ou non un pourcentage important de métaux porteurs de sulfures.

Lorsque des sels solubles et des acides se forment dans les couches extérieures du dépôt, ils peuvent être entraînés dans la nappe phréatique ou les eaux de surface par percolation à travers les stériles, causant ainsi une pollution. Les particules contenant des acides et des sels solubles peuvent également être dispersées dans l'environnement par érosion de la surface des stériles par l'eau et le vent.

7.4. CONTRÔLE DE LA FORMATION DE PRODUITS ACIDES

La formation de produits acides et des sels solubles associés peut être diminuée en évitant la présence d'air dans les pores des stériles. Si les conditions climatiques le permettent et si le bilan hydraulique du barrage est positif (pendant l'exploitation et après sa fermeture), cela peut être obtenu en maintenant les stériles submergés. Mais cette procédure a ses inconvénients :

- Lorsque la surface de la retenue de stériles est recouverte d'eau, le phénomène de percolation est continu et non négligeable. Dans les zones qui ne peuvent être recouvertes d'eau, les produits, issus de l'oxydation de la pyrite, peuvent être entraînés dans les eaux de surface ou souterraines.
- La conception hydrologique de la retenue doit garantir qu'il n'y aura pas de baisse importante du niveau d'eau, même en cas de sécheresse prolongée, ce qui se produit périodiquement dans la majeure partie du monde.
- La retenue doit être conçue de manière à minimiser l'action des vagues. Sinon, les vagues vont agiter l'eau et les stériles situés en fond de retenue, favorisant ainsi leur oxydation au contact de l'oxygène dissous dans les eaux de surface de la retenue.
- Dans le cas de stériles submergés en permanence, la quantité de stériles stockée dans un volume donné sera plus petite car leur densité sera plus faible que s'ils avaient été drainés.
- Une ligne de saturation haute et une faible densité des stériles peuvent menacer la stabilité du barrage, soit par une rupture de cisaillement, soit par liquéfaction des stériles, ou les deux.

Une autre solution consiste à mettre sur les stériles une couverture permettant d'empêcher le passage de l'air. Bien évidemment, ce procédé ne peut être mis en place qu'une fois l'exploitation terminée ou sur des parties qui ne seront plus utilisées. Cette méthode peut également être employée pour empêcher les fuites de gaz radon des retenues de stériles radioactifs.

content of the pyrite to form calcium, magnesium and iron sulphates. In a sterile environment the process of oxidation is very slow, but the presence of sulphur-oxidizing bacteria, principally thiobacillus ferrooxidans, can accelerate the oxidation process by a factor of 5 000 or more. The oxidation process is also temperature-dependent, taking place very slowly at low temperatures and accelerating as the temperature rises. The activity of the bacteria also increases with increasing temperature. Bacteria such as thiobacillus ferrooxidans are very common and are found in nearly all natural soils.

Tailings deposits very quickly become infected with the bacteria whether or not they contain appreciable contents of sulphur bearing minerals.

If soluble salts and acid form in the outer layers of a tailings deposit, they may be leached into the ground or surface water by seepage from the tailings, thus causing pollution. Also, particles of tailings carrying acid and soluble salts may be eroded from the surface of a tailings deposit and dispersed into the surrounding environment by both water and wind.

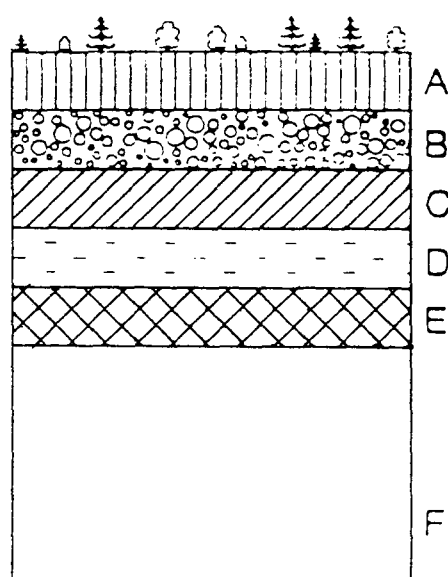
7.4. CONTROL OF ACID FORMATION

The formation of acid and associated soluble salts can be minimized by excluding air from the pores of the tailings. If climatic conditions are favourable and the water balance for the dam is positive (both during operation and after closure), air can be excluded from as much as possible of the tailings by keeping the surface permanently covered with water. However, this approach has its problems :

- If the surface of the impoundment is covered with water, seepage will be continuous and significant. Oxidation products of pyrite in areas that cannot be covered with water may thereby be leached into adjacent surface or ground water.
- The impoundment must be designed hydrologically so that the water level will never drop significantly, even in the severe droughts that occur periodically in most parts of the world.
- The pond must be designed so that wave action caused by wind is minimized. Otherwise, waves may stir up the water, as well as tailings on the base of the pond, allowing oxidation to occur by contact with oxygen dissolved in the surface layers of the pond water.
- If the tailings are kept permanently under water, they will be less dense than if they were allowed to drain, and hence usage of the available storage volume will be less effective.
- The high phreatic surface and low density may pose a threat of instability, either by shear failure, or liquefaction of the tailings, or both.

Alternatively, the deposit can be covered by capping layers designed to exclude air. This can obviously only be put in place once the impoundment has been closed, or on sections of the impoundment that will no longer be used for tailings deposition. This measure can also be used to retard the escape of radon gas from an impoundment of radio-active tailings.

Les matériaux de couverture sont des matériaux naturels, si cela est possible, ou des stériles ne contenant pas de pyrite (Aubertin et al., 1994). Cette couverture est généralement formée de plusieurs couches ayant chacune leur fonction. Un exemple d'Aubertin et al. (1993) est représenté sur la Fig. 4. Bien évidemment, une telle protection est très chère (jusqu'à 100 000 \$ US par hectare), et n'est pas nécessaire dans nombre de cas. Les stériles sont souvent des matériaux fins peu perméables à l'air. Par exemple, les stériles des mines d'or contiennent 50 % à 100 % d'éléments appartenant à la fraction silteuse ou plus fine. Cette finesse leur confère une faible perméabilité à l'air, limitant à 1 m à 1,5 m sous la surface l'oxydation de la pyrite qu'ils contiennent.



La Fig. 5 présente des profils types donnant, en fonction de la profondeur, le pourcentage de sulfure non oxydé, la conductivité et le pH sous la surface d'un dépôt de stériles, non recouvert, situé dans une région climatique aride et âgé de 40 ans. Ces profils montrent que les sulfures ont été oxydés jusqu'à 1 m - 1,5 m de profondeur. Le profil de conductivité montre que les sels solubles issus de l'oxydation des sulfures ont migré vers le bas et se sont concentrés à une profondeur d'environ 1 m. Le profil des pH montre également un pH faible vers 1 m de profondeur, un pH neutre vers 2,5 m, et des stériles lessivés par l'eau de pluie vers 0,5 m de profondeur.

Comme ce dépôt n'a pas été étanché à sa base, des percolations ont dû se produire lors de son exploitation. Cependant, comme indiqué sur la Fig. 5, l'eau rejetée aurait eu un pH de 6 (au pire) et une faible conductivité d'environ 100 mSm⁻¹. Ces valeurs sont considérées comme acceptables par les réglementations de nombreux pays.

The cap can be constructed of natural materials, if available, or else pyrite-free tailings can be used (e.g. Aubertin et al., 1994). Caps usually consist of a combination of layers each with a specific function. For example, Fig. 4 shows a multi-layer cap design by Aubertin et al. (1993). Obviously cap designs such as that shown are very expensive (up to USD 100 thousand per ha), and in many cases will not be necessary. Tailings often consist of very fine materials that have a low permeability to air. For example, gold tailings may contain 50 % to 100 % of particles in the silt particle size range, or finer. As a result of the fineness of the tailings, their permeability to air is low, and oxidation of the pyrite content of the tailings does not penetrate deeper than 1 to 1,5 m below the surface.

Fig. 4

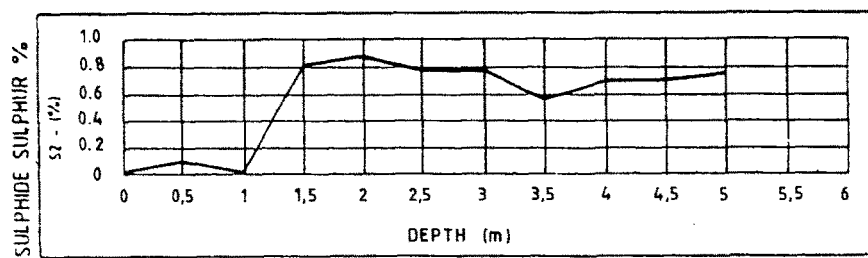
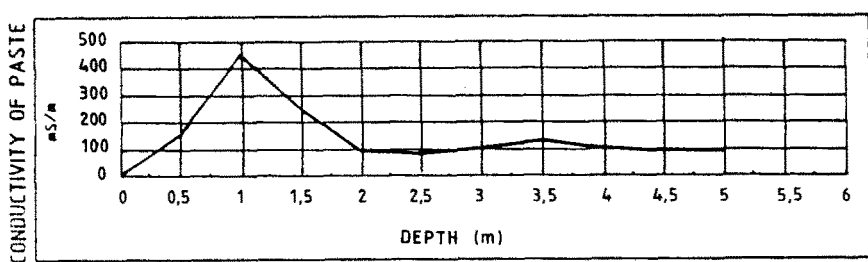
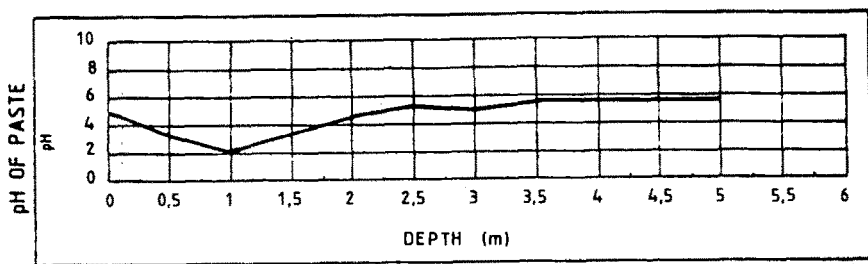
Multilayer cover system to prevent acid generation in pyritic tailings (after Aubertin and Chapuis, 1991)

Couverture à couches multiples empêchant la formation de produits acides dans des stériles contenant de la pyrite (d'après Aubertin et Chapuis, 1991)

A - Humid layer	A - <i>Couche humide</i>
B - Anti-intrusion layer	B - <i>Couche anti-intrusion</i>
C - Drainage layer	C - <i>Couche drainante</i>
D - Fine grain material layer	D - <i>Couche de matériau fin</i>
E - Non-capillary layer	E - <i>Couche anti-capillarité</i>
F - Acidic tailings	F - <i>Stériles acides</i>

Fig. 5 shows typical profiles of unoxidized sulphur, conductivity and pH below the uncovered surface of a tailings dam in a water-deficient area that was last deposited on 40 years ago. The profiles show that the sulphide in the tailings has been oxidized to a depth of 1-1,5 m below the surface. The conductivity profile shows that the soluble salts that resulted from oxidation of the sulphide have been leached downwards and have concentrated at a depth of about 1 m. The profile of pH similarly shows low pH conditions at about 1 m down, with tailings that are close to neutral from 2,5 m down and tailings leached by downward infiltration of rainwater down to about 0,5 m.

As this tailings dam is not under-lined, it would have emitted water from the base of the tailings when in use. However, as indicated by the data shown in Fig. 5, this water would have had a pH of about 6 (at worst) and also a relatively low conductivity of around 100 mSm⁻¹. This is acceptable in terms of many countries' effluent water standards.



Les barrages de stériles fins situés dans des climats arides ont un bilan hydraulique négatif après leur fermeture. Ceci, associé à une faible perméabilité des stériles (0,1 à 110 m/an), permet de garantir qu'il n'y aura pas de fuites par la base des stériles, une fois le dépôt fermé et la nappe dans le barrage rabattue au niveau du terrain naturel initial.

Il s'ensuit qu'à long terme, dans le cas d'un barrage de stériles fins avec un bilan hydraulique négatif, seule l'érosion de surface des stériles oxydés, mettant à jour plus de pyrite à oxyder, peut entraîner une pollution de l'eau. Pour limiter la production et l'émission d'eau de drainage acide, il est, par conséquent, important de limiter au maximum l'érosion de surface. Toutefois, la couverture du dépôt pour éliminer la production d'acides et de sels n'est souvent pas nécessaire.

Les résidus rocheux grossiers peuvent également être pyriteux et produire des acides. Traditionnellement, les stériles fins et grossiers sont stockés séparément. Les stériles grossiers sont généralement déposés par bennage, ce qui conduit à un dépôt

Fig. 5

Profiles of sulphide of sulphur, conductivity and pH for near surface tailings
from dam abandoned 40 years ago

*Profils donnant le pourcentage de sulfure, la conductivité et le pH sous la surface des stériles
d'un barrage abandonné depuis 40 ans*

Depth (m)	<i>Profondeur (m)</i>
pH of paste	<i>pH</i>
Conductivity of paste (mSm^{-1})	<i>Conductivité (mSm^{-1})</i>
Sulphide sulphur (%)	<i>Sulfure (%)</i>

For fine tailings dams situated in areas having water-deficient climates, the water balance after closure will be negative. This, together with the low permeability to water of the tailings (0.1 to 110 m/y) ensures that dams will not emit leachate from the base of the tailings once they have been closed and the phreatic surface within the body of the dam has subsided to original ground level.

It follows that the only way in which an abandoned fine tailings dam under water deficit conditions will cause water pollution on a long-term basis, is if oxidized tailings are eroded from its outer surface thus exposing more pyrite to oxidation. To limit the generation and emission of acid drainage, it is therefore important to reduce erosion of the outer surfaces of tailings dams to a minimum. However, capping will often not be required to eliminate acid and salt emission.

Coarse waste rock may also be pyritic and generate acid. Traditionally, coarse waste rock and fine tailings have been disposed of separately. The coarse waste is usually dumped by end-tipping, resulting in a dump of loose, highly permeable

de matériau grossier peu dense, très perméable à l'eau et à l'air. Plus récemment, les résidus grossiers ont été compactés afin de limiter la pénétration de l'air. Les dernières techniques consistent à déposer ensemble les stériles grossiers et fins. Dans cette méthode, les boues de stériles remplissent les vides à l'intérieur des stériles grossiers, ce qui rend l'ensemble presque imperméable à l'air et à l'eau. Bien que cette technique en soit actuellement au stade expérimental, il semble que, dans le futur, elle puisse être retenue pour constituer des dépôts qui seraient une forme hybride imperméable entre les barrages de stériles et les stockages en vrac. La formation d'acides et ses conséquences seraient minimisées par ce mode de dépôt.

coarse material that is very permeable to both water and air. More recently, coarse waste has been compacted to limit the ingress of air, and latest developments have been to co-dispose of coarse waste and fine tailings. In this process, a tailings slurry is used to fill the voids in the coarse waste and thus render the mass almost impervious to the ingress of both air and water. Although the process of co-disposal is still in the experimental state, it seems that in future, coarse and fine waste may be co-disposed to form deposits that will be an impervious hybrid between tailings dams and waste dumps. Acid formation and its consequences will be minimized with deposits of this type.

8. OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES ET ENVIRONNEMENT

Ce chapitre traite du fonctionnement des ouvrages d'évacuation d'eau (évacuateurs de crue ou ouvrages de décantation) avant et après la fermeture de l'exploitation, et de leurs effets possibles sur l'environnement.

8.1. AU COURS DE L'EXPLOITATION

La conception et l'exploitation des ouvrages de décantation des barrages de stériles, tels que ouvrage de décantation, évacuateur de crue, station de pompage flottante ou siphon, ont été largement traitées dans d'autres publications de la CIGB.

Ce sont des ouvrages importants pour la sécurité des barrages pendant l'exploitation, en ce sens qu'ils permettent d'évacuer les eaux du procédé de traitement ou les précipitations excédentaires afin de conserver le minimum d'eau possible dans la retenue pendant l'exploitation.

Du point de vue de l'environnement, une bonne conception et une exploitation bien conduite de ces ouvrages écartent la menace d'une submersion non contrôlée du barrage qui pourrait se traduire par la formation d'une brèche et une rupture d'ensemble du remblai.

Il est donc important de bien entretenir et utiliser les ouvrages d'évacuation pendant l'exploitation pour garantir l'intégrité de la retenue de stockage vis-à-vis de l'environnement.

8.2. APRÈS LA FERMETURE DE L'EXPLOITATION

Généralement, un ouvrage d'évacuation, d'un type tel que mentionné ci-dessus, aura été mis en place pendant l'exploitation, pour évacuer de la retenue les eaux excédentaires du procédé de traitement et les eaux de précipitation.

Si cet ouvrage est du type gravitaire, comme un évacuateur de crue, il peut être maintenu opérationnel après la réhabilitation et la fermeture du barrage.

Après fermeture du barrage, la capacité de cet ouvrage peut se révéler adéquate, car il n'aura plus à évacuer que les eaux de précipitation. Une revanche convenable et importante doit être prévue pour empêcher la submersion en cas de

8. TAILINGS DAM DECANT FACILITIES IN THE ENVIRONMENTAL CONTEXT

This section will deal with the functioning of outlet facilities (spillways or decants) for excess water both before and after operational closure of a tailings dam, and their possible effects on the environment.

8.1. OPERATIONAL PHASE

The design and operation of a tailings dam decant facility in the form of a decant, spillway, floating pumpstation or siphon is covered fully in other ICOLD publications.

These facilities are critical to the operational safety of a tailings dam in that they provide a means for constantly removing excess process and precipitation runoff from the dam in order to achieve the normal operational objective of retaining as little water as possible within the tailings impoundment.

From an environmental perspective a well designed and operated decant facility will remove the threat of uncontrolled overtopping of the dam walls which could lead to a breach and ultimate failure of the wall.

It is therefore necessary during the operational phase of any tailings dam for the decant facility to be well maintained and operated to preserve the environmental integrity of the impoundment.

8.2. POST CLOSURE PHASE

Generally an outlet in one of the abovementioned forms will have been provided during the operational phase of a tailings dam for the removal of supernatant process water and precipitation from the inner impounding zones of the dam.

If this facility was in the form of a gravity outlet such as a spillway, then it could be retained in operation after rehabilitation and closure of the dam.

The capacity of this facility after dam closure should be adequate, as it now only has to deal with precipitation and not the combination of process water and precipitation. Adequate and substantial freeboard must be ensured to prevent

précipitations exceptionnelles (il est recommandé de prendre la crue maximale probable). Toutefois, un entretien à long terme est nécessaire pour s'assurer que ces ouvrages restent efficaces, ne s'obstruent pas ou ne subissent pas de dégâts par suite d'altération.

Si l'ouvrage d'évacuation est du type station de pompage flottante ou siphon qui nécessitent la présence d'un opérateur et des travaux d'entretien, il peut être nécessaire, après la fermeture du barrage, de construire un nouvel évacuateur de crue gravitaire ne nécessitant pas la présence d'un opérateur. Pour assurer la sécurité à long terme du barrage, la conception d'un tel ouvrage doit tenir compte de facteurs tels que le bassin versant, la crue de projet (la crue maximale probable est recommandée) et la revanche de sécurité requise.

Les barrages situés en régions arides, où l'évaporation annuelle est supérieure aux précipitations, peuvent être fermés sans dispositif d'évacuation des eaux excédentaires, sous réserve de présenter une revanche convenable capable d'absorber les eaux de ruissellement lors de précipitations exceptionnelles et d'une série d'années plus humides que la moyenne. La surveillance à long terme de la capacité de stockage d'eau du barrage est cependant nécessaire. Il est important de souligner que le stockage d'eau derrière un barrage de stériles abandonné est défavorable pour sa stabilité et accroît les percolations à long terme.

overtopping during a major storm (probable maximum flood design is recommended). Long-term maintenance will however be required to ensure that the facility remains open and does not block or suffer damage as a result of weathering, etc.

If the operating decant facility was in the form of a floating pumpstation or siphon which requires operator attendance and maintenance, then on closure of the dam it may be necessary to provide a new permanent gravity spillway that will serve the dam without attendance. The design of such a facility should take into account factors such as the catchment area of the dam, the design storm (probable maximum flood is recommended), and the required safe freeboard in sizing the spillway to ensure the long-term safety of the dam.

Dams in dry regions where annual evaporation exceeds rainfall, may be able to accept closure without the provision of any outlet for excess water, providing there is adequate freeboard to absorb the rainfall runoff from major storms and a series of wetter than average rainfall seasons. Long-term monitoring of the stored water status of the dam will however be necessary. It must be stressed that storage of water on top of a closed tailings dam could be detrimental to the shear stability of the dam and will lead to increased long-term seepage.

9. AUSCULTATION PENDANT L'EXPLOITATION

9.1. GÉNÉRALITÉS

Dans ce contexte, l'auscultation consiste à observer et à mesurer divers facteurs significatifs du comportement des barrages et dépôts de stériles, puis à les comparer aux prévisions du projet, ou aux prescriptions réglementaires, afin d'assurer l'intégrité du barrage vis-à-vis de l'environnement.

L'auscultation doit s'effectuer dès le démarrage des travaux et pendant l'exploitation du barrage et, également, après sa fermeture et pendant la période d'entretien qui s'ensuit.

Les points auscultés directement liés à l'intégrité du barrage et de la retenue vis-à-vis de l'environnement sont les suivants (non donnés nécessairement en ordre de priorité) :

- la migration des sels solubles dans la nappe phréatique et les eaux de surface à proximité de la zone de dépôt,
- l'érosion et la dispersion de stériles solides de la surface de la retenue sous l'action du vent et de l'eau,
- les diverses caractéristiques de la retenue de stockage en relation avec sa stabilité et sa sécurité.

9.2. STABILITÉ ET SÉCURITÉ

La stabilité et la sécurité agissent de manière indirecte sur l'environnement. Une rupture ou une brèche dans un barrage peut provoquer un déversement des stériles, détériorant l'environnement naturel et humain situé à l'aval de la brèche, et pouvant entraîner de possibles pertes en vies humaines et dommages matériels. Un exemple est la brèche du barrage de stériles de Bafokeng en Afrique du Sud, en 1974. La brèche, probablement due à un déversement, a permis à 3 millions de mètres cubes de boues de stériles de se répandre hors du barrage. Le flot de boues a inondé un puits de mine proche du site, noyant 12 personnes. Il a continué sa course vers la rivière, et a été arrêté lorsqu'environ 2 millions de mètres cubes de boues de stériles sont entrés dans une retenue de stockage d'eau située à 45 km de la retenue de stériles. Un million de mètres cubes de stériles se sont déposés sur le trajet et sur les berges de la rivière.

Les aspects importants à ausculter pour la sécurité et la stabilité d'un barrage sont :

- lignes de percolation,

9. MONITORING OF OPERATIONS

9.1. GENERAL

In this context, the verb “monitor” means to observe and make measurements of various significant aspects of tailings impoundment behaviour, and to compare the observations and measurements against the design expectations for the tailings dam, or against relevant statutory requirements, thereby ensuring the environmental integrity of the dam.

Monitoring should relate both to the commissioning and operational phases of the life of a tailings impoundment and also to the decommissioning, closure and aftercare stages.

Aspects of monitoring relating directly to the environmental integrity of a tailings impoundment are the following (not necessarily in order of priority):

- The migration of soluble salts into the ground water or surface water adjacent to the impoundment.
- Erosion and dispersion of tailings solids from the surfaces of the impoundment by the action of wind and water.
- Various features of the impoundment associated with its stability and safety.

9.2. STABILITY AND SAFETY

Stability and safety do not impinge directly on the environment, but do so indirectly. If there were to be a failure or breach in a tailings dam, tailings could be spilled, damaging the natural and man-modified environment downstream of the breach and possibly causing loss of life and damage to property. An example of this was the breaching of the Bafokeng tailings dam in South Africa in 1974. The breach, probably caused by overtopping, allowed three million cubic metres of liquid tailings slurry to escape the dam. The tailings flow flooded a nearby mine shaft, drowning 12 people. The flow continued down a water-course into a river, and was eventually halted when an estimated two million cubic metres of tailings flowed into a water storage dam, 45 km from the tailings impoundment. One million cubic metres of tailings were left deposited in the water course and on the banks of the river.

The important aspects of monitoring for safety and stability are the following:

- Seepage surface

- la résistance au cisaillement,
- les défauts et déformations visibles,
- les relevés topographiques,
- les mesures du débit de percolation.

L'auscultation visant à conserver l'intégrité de l'environnement doit être effectuée pendant toutes les phases de la vie de la retenue de stériles. La nécessité d'une auscultation sur le plan de la sécurité et de la stabilité du barrage est probablement plus importante et plus immédiate pendant l'exploitation, mais elle doit être poursuivie moins intensivement ou moins fréquemment à la fermeture et pendant la période d'entretien qui s'ensuit. Les divers aspects de l'auscultation sont abordés ci-après en détail.

9.3. SURVEILLANCE DES NAPPES SOUTERRAINES ET DES EAUX DE SURFACE

La pollution de la nappe phréatique est surveillée en effectuant des sondages à proximité de la retenue et en y prélevant régulièrement des échantillons d'eau pour analyse chimique. Le dispositif d'auscultation de la nappe doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Les sondages doivent être tubés avec des matériaux inertes et inactifs tels que le polyéthylène haute densité. Le tubage doit être crépiné sur toute sa longueur (fentes ou grillage fin). L'espace annulaire entre le tubage et le trou de forage doit être rempli avec un sable ou gravier propre quartzeux.
- Les forages doivent être étanchés en tête pour empêcher la pénétration d'eau de surface et protégés par des capots (résistant si possible au vandalisme).
- Les forages doivent être de diamètre assez grand pour pouvoir y introduire une pompe submersible (une pompe d'un diamètre de 50 mm est utilisable), et la pompe doit être construite ou revêtue de matériaux inertes. En variante au pompage, on peut utiliser une soupape en acier inoxydable ou en téflon.
- Des échantillons d'eau doivent être prélevés à l'amont et à l'aval de la retenue de stériles pour voir si l'eau ayant traversé la retenue a une composition comparable à l'eau prélevée en amont. Dans le cas d'un bassin annulaire éloigné d'un cours d'eau, il est nécessaire de déterminer le sens de l'écoulement de la nappe souterraine en mesurant sa cote dans les forages et son gradient.

Les opinions diffèrent sur les méthodes de prélèvement. Certains règlements demandent que l'eau soit pompée dans le forage et que la conductivité électrique soit mesurée périodiquement. Une fois celle-ci constante, l'eau peut être prélevée pour être analysée. Cette procédure n'est pas toujours possible. C'est le cas de forages situés dans une couche argileuse où l'on ne peut pas pomper assez d'eau pour atteindre une conductivité constante. Dans ce cas, on doit prélever l'eau arrivée dans le forage par percolation lente.

- Strength profile
- Visible defects and deformation
- Survey measurements
- Seepage flow measurements.

Monitoring relating directly to maintenance of environmental integrity must be carried out through all the phases of a tailings impoundment's life. The need for monitoring for safety and stability are probably more important and immediate during the operational phase, but should be continued at a reduced level, or at less frequent intervals during decommissioning, closure and after care. The various activities associated with monitoring will now be described in more detail.

9.3. MONITORING OF GROUND AND SURFACE WATER

Pollution of the ground water is usually monitored by drilling a series of boreholes in the vicinity of the tailings impoundment to intersect the ground water, sampling the ground water periodically and chemically analysing the samples. The ground water monitoring system must meet the following requirements :

- Boreholes must be lined with casings of inert, unreactive materials, e.g. high density polyethylene. Casings should either be slotted over their entire length, or consist of a fine mesh. The annulus between the casing and the sides of the borehole should be filled with clean quartzite sand or gravel.
- Boreholes should be sealed against the ingress of surface water and fitted with tamper-proof (and preferably vandal-proof) caps.
- Boreholes should be of large enough diameter to accommodate a submersible pump (pumps of 50 mm diameter are available), and the pump should also be made or lined with inert material. As an alternative to pumping, a stainless steel or teflon bailer may be used.
- Ground water both upstream and downstream of the impoundment should be sampled so that analyses of water that has passed under the impoundment can be compared with the background or datum analysis of upstream water. In the case of a ring dyke not near any water course, it will be necessary to establish the flow direction of the ground water by establishing the absolute rest levels of water in the boreholes and hence the gradient of the phreatic surface.

Opinions differ on the sampling procedure. Some authorities insist that the borehole be pumped and the electrical conductivity be measured periodically. Once the conductivity has become constant, the sample is taken for analysis. This procedure is not always possible as, if the borehole is in clayey strata, it may not yield enough water to pump to constant conductivity. In this case, the water collected by slow seepage into the borehole has to be sampled.

Les échantillons doivent être conservés dans des bocaux stérilisés, en verre ou en téflon, et être analysés dès que possible. Les analyses de l'eau à l'aval seront comparées à celles de l'eau à l'amont et aux normes requises, pour voir si la retenue de stériles provoque une pollution inacceptable des eaux de la nappe. Si c'est le cas, des mesures de protection ou d'étanchéité devront être prises.

En complément de l'auscultation par prélèvement dans des sondages, tous les écoulements d'eau ou résurgences à proximité de la retenue doivent également être échantillonnés (à l'amont et à l'aval) pour analyse des éléments polluants.

9.4. ÉROSION ET DISPERSION DES STÉRILES SOLIDES

Les facteurs déterminants de l'érosion des pentes et des surfaces des retenues de stériles ne sont pas totalement compris. Des études importantes de l'érosion des pentes ont été faites par des agronomes, mais les résultats de leurs recherches ne peuvent pas s'appliquer directement aux talus des barrages de stériles qui sont généralement plus raides (30°, voire plus) que ceux étudiés par les agronomes (15° ou moins). Néanmoins, il est admis que les facteurs suivants ont une grande influence sur l'érosion des pentes :

- la longueur du talus et, par suite, la quantité d'eau tombée sur ce talus pendant une pluie d'intensité donnée,
- la pente du talus qui conditionne largement la vitesse d'écoulement de l'eau et, par suite, son pouvoir érosif,
- d'autres facteurs, tels que la couverture végétale et l'intensité de la pluie, ont aussi une importance.

Les forces d'érosion sont contrecarrées par la cohésion des matériaux en surface. Si le matériau mis en place est peu dense et non compacté, il est facilement érodable. S'il est compacté ou protégé par une couverture en éléments grossiers qui dissipent l'énergie, il résistera mieux à l'érosion.

Des pertes de stériles d'au moins 500 tonnes/ha de talus/an ont été mesurées sur des barrages de stériles de mines d'or. Ceci pose un véritable problème de maintenance et d'environnement. Le matériau est entraîné par l'eau et par le vent. Les pertes varient avec les saisons et sont fonctions des conditions climatiques locales, comme le sont les pourcentages respectifs d'érosion par le vent ou par l'eau.

Des recherches en Afrique du Sud ont montré que, pour des retenues de stériles de mines d'or, dont la surface n'a pas été traitée :

- les pertes dues à l'érosion par la pluie et par le vent sont approximativement égales,
- l'érosion s'effectue essentiellement sur les talus de la retenue de stériles, et peu sur la surface supérieure,
- l'érosion est proportionnelle à la longueur du talus,
- l'érosion est peu active sur des pentes inférieures à 20° ou supérieures à 40°.

Samples should be placed in clean sterilized glass or teflon bottles and analysed as soon as possible after taking. The analyses of samples from downstream should be compared with those of upstream samples and with statutory requirements to establish if the tailings impoundment is causing unacceptable pollution of the ground water. If this is the case, remedial or cut-off measures will have to be instituted.

In addition to sampling monitoring wells, any stream or seepage of water emerging at the surface near the impoundment should also be sampled (both upstream and downstream) and analysed for pollution.

9.4. EROSION AND DISPERSION OF TAILINGS SOLIDS

The factors controlling the erosion of the slopes and surfaces of tailings impoundments are not well understood. Extensive studies of slope erosion have been made by agriculturalists, but the results of their research cannot be applied directly to the slopes of tailings dams because the latter are usually far steeper (up to 30° and more) than the slopes studied by agriculturists (15° and less). Nevertheless, it is known that the following factors have a strong influence on the erosion of all slopes :

- the length of the slope, and hence the quantity of water falling on the slope in a storm of given intensity; and
- the slope angle, which largely controls the velocity with which water runs down the slope, and hence the erosive energy of the water.
- Other factors such as vegetation cover and intensity of rainfall are also of importance.

The forces of erosion are resisted by the strength of the slope surface. If this is loose and uncompacted, it will erode easily. If it is compacted, or armoured by being covered with a layer of large particles that dissipate erosive energy, it will better resist erosion.

Losses of tailings from the slopes of gold tailings dams of as much as 500 tons per hectare of slope per year have been measured, hence erosion can pose a very significant maintenance and environmental problem. Material can be lost by both wind and water erosion. The loss varies seasonally and is dependent on local climatic conditions, as are the relative proportions of wind and water erosion.

Research in South Africa has shown that for gold tailings impoundments having an untreated tailings surface :

- erosion losses resulting from rainfall and wind are roughly equal in magnitude;
- most of the erosion occurs from the slopes of a tailings impoundment, and relatively little from the top surface;
- erosion losses are roughly proportional to slope length; and
- relatively little erosion occurs from slopes flatter than 20° or steeper than 40°.

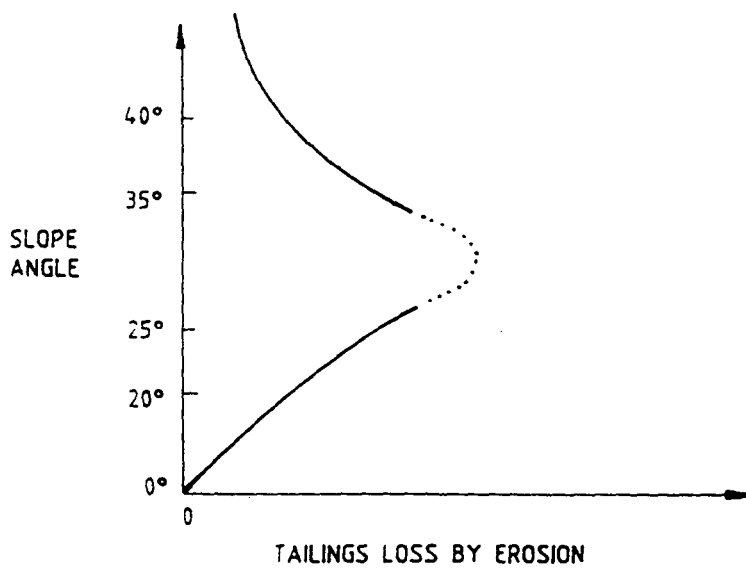
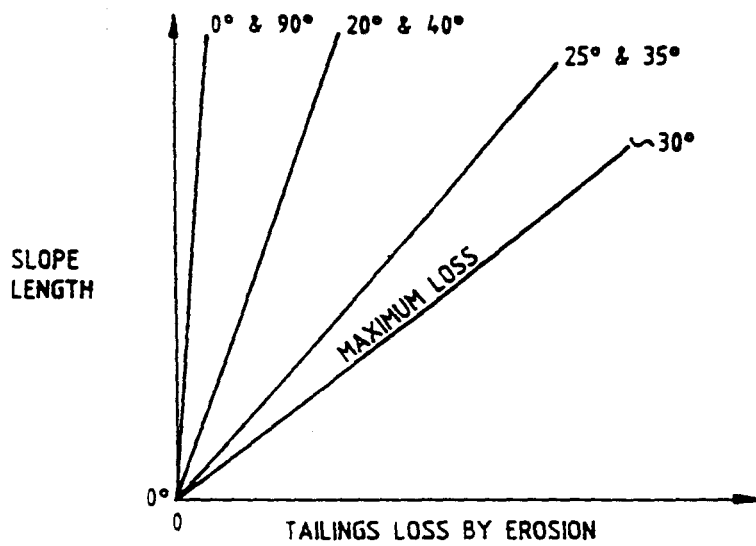


Fig. 6

Effects of slope length and slope angle on rates of erosion from the outer slopes of tailings dams
Effets de la longueur et de la pente des talus sur le degré d'érosion des talus des barrages de stériles

Slope length	<i>Longueur du talus</i>
Maximum loss	<i>Perte maximale</i>
Tailings loss by erosion	<i>Stériles perdus par érosion</i>
Slope angle	<i>Pente du talus</i>

L'érosion est maximale pour des pentes de 25° à 35°. Une couverture végétale empêche l'érosion par le vent, mais apparaît moins efficace contre l'érosion par l'eau. Toutefois, l'impact de la pluie sur la surface est réduit par la végétation, et les racines renforcent la résistance de la couche de surface. Les conclusions concernant les talus et leur pente sont récapitulées schématiquement sur la Fig. 6. L'érosion par ravinement est réduite si l'on empêche l'eau de couler en cascade depuis la crête du barrage ou des pentes environnantes.

La vitesse d'érosion peut être suivie en plantant une série de pointes en acier sur la surface des stériles selon un maillage donné. La perte de matériau est ensuite quantifiée en mesurant l'abaissement de la surface par référence à l'extrémité de la pointe.

Hormis ces auscultations spéciales, on doit surveiller sur les talus aval de tous les barrages de stériles l'apparition de ravinements. Ceux-ci doivent être réparés dès que possible, dès leur formation, car ils se développent très rapidement et peuvent entraîner la formation d'une brèche dans le barrage.

Pour les dépôts de stériles dont la surface a été végétalisée (voir chap. 10 - Réhabilitation de la surface des stériles vis-à-vis de l'environnement), la qualité de la végétation doit être surveillée et tout dégât dû à l'érosion par l'eau, le vent ou la sécheresse doit être réparé.

9.5. AUSCULTATION SUR LE PLAN DE LA SÉCURITÉ, DE LA STABILITÉ ET DU RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT

9.5.1. Lignes de percolation

La hauteur et la position des lignes de percolation peuvent être déduites de mesures piézométriques faites à tube ouvert ou au moyen de cellules. Il est généralement plus pratique d'installer un tube piézométrique une fois que le barrage ou la retenue de stériles a atteint une certaine hauteur. Le tube peut être prolongé si nécessaire en ajoutant des tubes en surface. Les tubes piézométriques sont généralement installés suivant un profil normal au talus du barrage, en des points critiques du point de vue de la stabilité. Un nombre suffisant de piézomètres est nécessaire pour déterminer avec précision la ligne de percolation. Le piézomètre donne la pression interstitielle à sa base. La zone de percolation doit être estimée en construisant un réseau d'écoulement à partir des mesures ponctuelles de pression interstitielle, et en essayant de prendre en compte l'anisotropie de perméabilités des stériles.

9.5.2. Profil de résistance

Le profil de résistance au cisaillement d'un barrage de stériles est bien établi en réalisant des essais in situ au scissomètre, au pénétromètre statique, ou au pressiomètre, dès que 5 m ou plus de matériaux sont déposés. Les résultats de ces essais in situ peuvent alors être comparés aux valeurs admises dans le projet et la pente du talus des stériles peut être modifiée si nécessaire.

Erosion losses reach a maximum for slope angles of between 25° and 35°. While vegetational cover on a slope inhibits wind erosion, it apparently does less to prevent erosion by water. However, rain drop impact is reduced by vegetative cover, and the roots of vegetation assist by reinforcing the residue surface. The conclusions regarding slope length and angle are shown schematically in Fig. 6. Gully erosion is reduced if slopes are protected from water cascading down from either the top of the dam wall, or from slopes higher up.

Rates of erosion may be monitored by driving a series of steel pegs into the surface of the tailings on a grid pattern. The loss of material can then be assessed by measuring the retreat of the surface using the tops of the steel pegs as a datum.

Apart from this rather specialized measurement, the downstream slopes of all tailings dams should be monitored for the formation of erosion gulleys. These should be repaired immediately they start to form, as gulleys can develop very rapidly and can result in breaching of the dam.

Where the surface of the tailings deposit has been vegetated (see 10 - Environmental Rehabilitation of Tailings Surfaces), the quality of the vegetation should also be monitored and any damage caused by water, wind erosion or drought repaired.

9.5. MONITORING FOR SAFETY, STABILITY AND ENVIRONMENTAL INTEGRITY

9.5.1. Seepage surface

The height and position of seepage surfaces may be deduced by means of measurements on stand-pipe piezometers, or by means of piezoprobe measurements. It is usually convenient to install stand-pipe piezometers once the dam or residue has reached a certain height. The stand-pipes can then be extended as necessary by adding sections of tubing at the surface to increase their height. Stand-pipes are usually installed along a section normal to the slope of the dam at points critical for stability. A sufficient number of stand-pipes must be installed to enable the seepage surface to be accurately determined. Each piezometer will record the pore pressure at its tip. The seepage surface must be estimated by constructing a flow net for the slope, based on the point measurements of pore pressure, and attempting to take account of any anisotropy of the tailings permeability.

9.5.2. Strength profile

The strength profile for a tailings dam is best monitored by performing in situ vane shear, cone penetration or pressuremeter tests after five or more metres of material has accumulated in the deposit. The results of these in situ tests can then be compared with conditions assumed for the design and the slope of the tailings can, if necessary, be amended accordingly.

9.5.3. Défauts et déformations visibles

Des inspections régulières de l'état des talus des dépôts de stériles constituent une partie essentielle de tout programme de surveillance de la sécurité et de la stabilité. Pendant ces inspections visuelles, une attention particulière doit être portée sur les points suivants :

- la présence de fissures parallèles ou transversales à la crête des talus, ou la présence de fissures de même orientation sur les talus proprement dits,
- la présence de fissures dans les sols en pied de talus et tout déplacement ou distorsion visibles (horizontal ou vertical) des tranchées de drainage en pied de talus,
- tout affaissement de la crête des talus ou tout renflement en pied de talus,
- l'émergence de percolations en pied de talus, révélée par l'humidité de surface, par une concentration locale de végétation ou par une érosion excessive.

Il faut souligner que le point apparent de l'émergence des percolations à la surface d'un talus correspond généralement au point haut de la frange capillaire et non à la ligne de saturation elle-même. Cependant, on est du côté de la sécurité en considérant ce point comme l'émergence de la ligne de saturation.

9.5.4. Relevés topographiques

La topographie peut également être utilisée pour ausculter les dépôts de stériles. La méthode la plus simple utilise une ligne de bornes situées le long du pied du talus. Ces bornes sont alignées et nivelées à leur mise en place. On procède ensuite à des mesures périodiques de nivellement et d'alignement. Tout déplacement de l'une des bornes vers le haut ou l'extérieur, ou une combinaison des deux, traduira le développement d'une instabilité dans le talus. Une ligne semblable de bornes peut être installée sur les risbermes situées à des cotes intermédiaires du talus. L'auscultation des repères topographiques peut également s'effectuer par photogrammétrie.

Des inclinomètres peuvent être mis en place dans les talus pour détecter d'éventuels mouvements en profondeur. Un inclinomètre consiste en un pendule descendu dans un tubage rainuré longitudinalement suivant deux directions à angle droit. Au fur et à mesure de sa descente, l'inclinomètre mesure la verticalité du tube dans deux directions perpendiculaires. Ces deux directions sont généralement parallèle et perpendiculaire à la pente du talus. Par intégration des inclinaisons mesurées, on déduit le déplacement latéral du tube par rapport au pied du tube. Le déplacement absolu est ensuite obtenu par relevé topographique de la tête du tube.

9.5.3. Visible defects and deformations

Regular inspections of the condition of the slopes of tailings deposits also form an essential part of any monitoring programme for safety and stability. During these visual inspections particular attention should be paid to the following :

- the presence of cracks parallel to or transverse to the crest of the slopes or the presence of similarly oriented cracks on the slopes themselves;
- the presence of cracks in the soil at the toe of the slope and any visible displacement or distortion (either horizontally or vertically) of solution or drainage trenches at the toes of the slopes;
- any visible sagging of the crest of the slope or bulging at the toe of the slope;
- the emergence of seepage at the toe of the slope is indicated by a wet appearance of the surface, local concentrations of plant growth or excessive erosion of the slope.

It should be noted that the point of apparent emergence of the seepage surface from a slope usually defines the top of the capillary fringe above the seepage surface, and not the seepage surface itself. However, it is conservative to assume that this point represents the emergence of the seepage surface.

9.5.4. Survey measurements

Survey methods may also be used to monitor residue deposits. The simplest form of survey system consists of a line of monuments along the toe of the slope. These monuments are aligned on installation and also levelled. Thereafter, periodic observations for line and level are made. The upward or outward, or a combination of upward and outward movement of any of the line of monuments would indicate the development of shear instability in the slope. A similar line of monuments could be installed on berms part way up the slopes of a residue deposit. Surveying of monuments can also be undertaken by close-range photogrammetry.

Slope indicators can be installed in slopes to show if deep-seated movement is taking place. A slope indicator consists of a pendulum-actuated instrument that is lowered down a lined borehole in which the lining is equipped with two sets of longitudinal guiding tracks at right-angles. As it travels down the borehole, the slope indicator continuously records the verticality of the lining in two directions at right angles. These directions are usually parallel to and at right-angles to the length of the slope. By integrating the recorded slopes of the borehole lining, the lateral movement of the lining relative to the bottom of the lining can be established. Absolute movements are then obtained by surveying in the surface collar of the lining.

9.5.5. Mesures du débit de percolation

Le fonctionnement du système de drainage de pied d'un barrage ou de drains collecteurs installés au-dessus ou en-dessous d'un revêtement peut être suivi en mesurant et en enregistrant le débit, qui ne doit pas trop s'écarter du débit calculé.

9.5.6. Revanche

Comme indiqué par ailleurs dans ce document, la conservation d'une revanche adéquate est essentielle à la sécurité de tout barrage de stériles. La revanche en phase d'exploitation doit être mesurée et enregistrée mensuellement au moyen de méthodes fiables.

9.5.7. Surveillance par satellite

Une grande partie de la surface du globe est actuellement couramment surveillée par satellite à intervalle de temps régulier. L'auscultation des barrages de stériles, par images satellites, devrait être faite régulièrement (tous les 6 mois). Les images satellites constituent un moyen efficace pour vérifier la dimension et la position de la retenue, l'humidité des talus, etc...

9.5.5. Seepage flow measurements

The functioning of under-drainage of a dam or collector drains installed above or beneath a liner can be monitored by measuring and recording the rates of discharge of the drains which should agree reasonably well with the calculated quantity of discharge.

9.5.6. Freeboard

As emphasised before in this document, the maintenance of adequate freeboard is essential to the safety of every tailings dams. The operating freeboard should be measured and recorded by accurate survey methods on a monthly basis.

9.5.7. Satellite surveillance

Much of the earth's surface is now routinely covered by satellite imagery at regular time intervals. Examination of tailings dams by means of these images should be made on a regular (six monthly) basis. Satellite images provide an effective means of checking on such features as pool size and position, wetness of slopes, etc.

10. RÉHABILITATION DE LA SURFACE DES STÉRILES VIS-À-VIS DE L'ENVIRONNEMENT

(Note : Cette partie a été écrite à partir d'expériences en climat chaud, semi-aride, où l'évaporation potentielle est au moins deux fois plus importante que les précipitations. Elle devra être complétée pour les climats froids et humides, et les déserts.)

10.1. CONTRÔLE DE L'EAU

Pendant l'exploitation du barrage de stériles, l'eau de surface est évacuée par des tours de décantation, des stations de pompage flottantes, des évacuateurs de crue, des siphons, etc., et envoyée dans le circuit de recyclage d'eau pour réutilisation. Les eaux de précipitations sur les pentes externes sont collectées dans des bassins en pied du dépôt où elles s'évaporent ou sont renvoyées vers l'usine.

A la fermeture de l'exploitation, les procédures changent. Dans les régions semi-arides, l'évaporation est supérieure aux précipitations et il y a généralement tous les mois un déficit de précipitations. Aussi toutes les précipitations sur le dépôt peuvent-elles être retenues sans risque. Un système de contrôle strict de la répartition de l'eau doit être mis en place, et son accumulation en grande quantité sur tout ou partie du dépôt doit être évitée.

En surface du dépôt, un ensemble de bassins est construit avec le matériau disponible, mis en cordon au moyen d'un buteur. Ces cordons ont généralement une hauteur de 1 m avec une largeur en crête de 0,5 m. Ils sont construits le long du périmètre extérieur et en surface du dépôt suivant un espacement de 70 m environ. Le mouvement de l'eau dans chaque bassin est empêché en réalisant par labourage une série de sillons et de levées, les levées étant espacées de 0,5 m et les sillons ayant 0,5 m de profondeur. Le remblai périphérique empêche l'eau de surface de partir, et la conduite d'évacuation est isolée par un remblai annulaire. Des bassins sont construits en pied du dépôt pour récupérer et évaporer les eaux de pluies tombées sur les talus extérieurs du dépôt. Ils sont dimensionnés afin de pouvoir retenir, avec une revanche de 0,5 m, la pluie journalière centennale. La Fig. 7 illustre le principe de division par bassins et diguettes de crête.

10. ENVIRONMENTAL REHABILITATION OF TAILINGS SURFACES

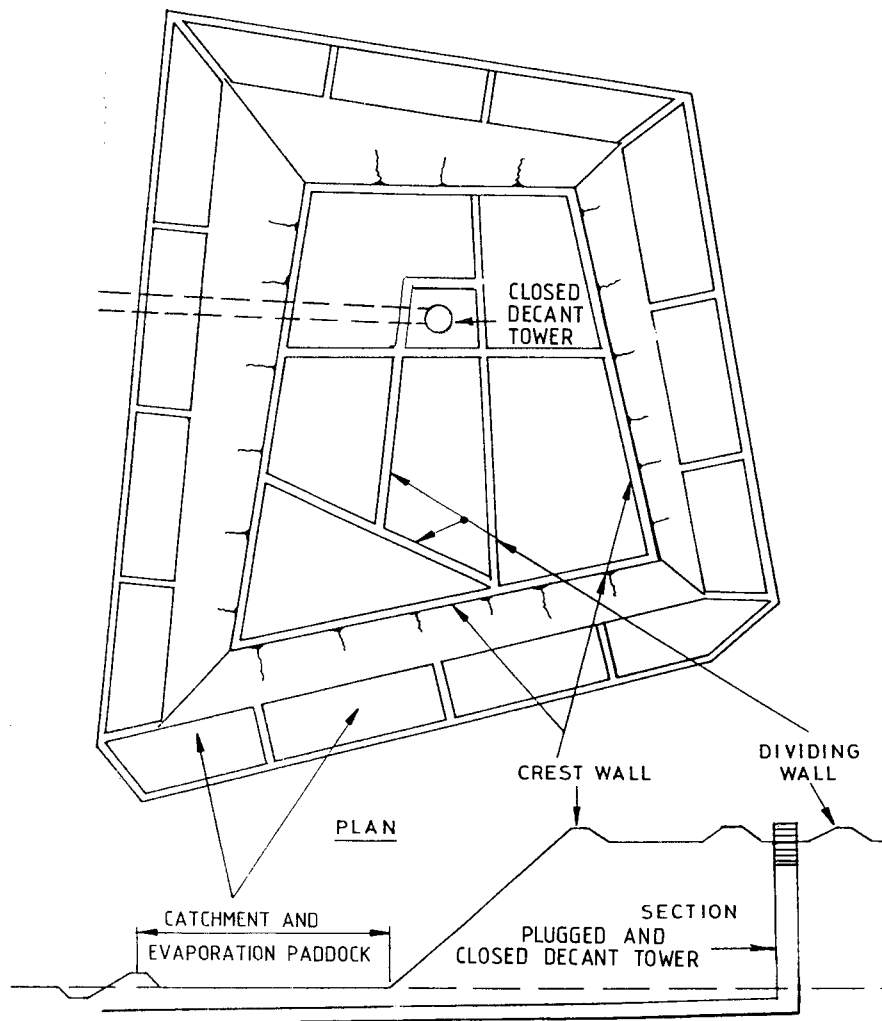
(Note : This section has been written from experience with warm semi-arid climatic conditions, where potential evaporation is more than twice precipitation. It should be supplemented for cool humid and for desert conditions.)

10.1. WATER CONTROL

While the tailings deposit is operational, any water on the surface is removed by means of decant towers, pump barges, spillways, syphons, etc. and discharged into the return water circuit for re-use. Precipitation on the outer slopes is collected in paddocks at the base of the deposit and evaporated or also sent to the plant.

At closure of the deposit, however, the procedure changes. In semi-arid regions evaporation exceeds precipitation and there is often a nett loss to evaporation every month of the year. All precipitation on the top can thus safely be retained on the top of the deposit. Strict control must be implemented on the distribution of water and the accumulation of water in quantity on any part of the top of the deposit must be prevented.

The top surface of the deposit is paddocked off by means of walls, bulldozed up from in situ material. These are usually one metre high with a crest width of half a metre, and are constructed around the outer perimeter and across the top of the dam, on contour, about 70 m apart. Water movement, within each paddock, is prevented by ridge ploughing the surface, on contour, to form a series of ridges and valleys with crests about 0,5 m apart and valleys about 0,5 m deep. The perimeter walls prevent the escape of any water from the top of the dam and the penstock is isolated by means of a ring wall. Paddocks are constructed around the base of the deposit to catch and evaporate rainwater that falls on the sides. The paddocks are sized so that they are able to hold the water from a 1 in 100 year storm of 24 hour duration with a 0,5 m freeboard. Fig. 7 illustrates the principle of subdivision by paddocks and crest walls.



10.2. PRÉVENTION DE LA POLLUTION DE L'AIR

Lorsque les stériles sèchent en surface du dépôt, ils perdent leur cohésion capillaire et deviennent très sensibles à l'érosion par le vent et l'eau. Jusqu'à ce qu'une végétation s'installe en surface du dépôt, le labourage est, à court terme, la méthode la moins chère et la plus efficace pour réduire l'érosion par l'eau et le vent. Un labourage annuel est suffisant pour réduire l'entraînement de poussières lors de vents très forts.

Après labourage, le matériau érodé s'accumule dans les sillons, au lieu d'être transporté ailleurs par le vent et l'eau; il forme alors une excellente couche de semis. Les précipitations sont également collectées dans les sillons et facilitent le lessivage des sels solubles et des acides. Ceci permet à la végétation de pousser et de s'établir sur la surface du dépôt pendant la période climatique favorable de l'année.

Fig. 7

Principle of surface water control by crest and dividing walls

Représentation schématique du contrôle de l'eau de surface au moyen de diguettes de crête et de séparation

Plan	<i>Vue en plan</i>
Section	<i>Coupe transversale</i>
Closed decant tower	<i>Tour de décantation fermée</i>
Plugged and closed decant tower	<i>Tour de décantation obturée par injection et fermée</i>
Crest wall	<i>Diguette de crête</i>
Dividing wall	<i>Diguette de séparation</i>
Catchment and evaporation paddock	<i>Bassin de récupération et d'évaporation des eaux</i>

10.2. PREVENTION OF AIR POLLUTION

As the surface of tailings dries it loses its capillary cohesion and becomes susceptible to wind and water erosion. Until vegetation is established on the top of the deposit, ridge ploughing is the most cost-effective short-term method of reducing both wind and water erosion. It is normally only necessary to ridge plough once annually, to reduce fugitive dust when very high wind velocities occur.

After ridge ploughing eroded material, instead of blowing or washing away, collects in the valleys between the ridges and forms an excellent seedbed. Precipitation also collects in the valleys and promotes natural downward leaching of acid and soluble salts in the surface material. This helps with the establishment of vegetation and enables the top vegetation to be established using dryland techniques during favourable weather conditions.

10.3. VÉGÉTALISATION

Les talus d'un dépôt de stériles peuvent présenter une pente trop raide ou avoir une croûte de surface trop dure (ou les deux), et ils sont souvent pauvres en éléments nutritifs pour les plantes. Le matériau de surface peut également être acide avec un pH variant de 5 à 2, voire moins. Toute acidité peut provoquer des réactions avec les autres minéraux présents dans les stériles, produisant des sels qui migrent vers la surface par capillarité sous le gradient d'évaporation. En surface, l'eau s'évapore, laissant sur place les sels et une concentration d'acides. Ceci constitue un environnement particulièrement hostile à l'établissement de la végétation, et les stériles doivent être lessivés et traités pour pouvoir être assuré du succès de la végétalisation.

10.3.1. Végétalisation des talus du dépôt de stériles

Lorsque les stériles sont acides, ils doivent être traités par application de chaux pour remonter leur pH, d'engrais divers fournissant les éléments nutritifs nécessaires, et par arrosage pour lessiver vers l'intérieur du dépôt les sels et acides. Comme l'intérieur du dépôt est souvent alcalin, les acides sont neutralisés et les sels immobilisés.

Un lessivage naturel par infiltration de l'eau de pluie s'effectue souvent sur la surface du dépôt, mais, sur les bords, il est nécessaire de lessiver les stériles en les arrosant par aspersion.

Sur les zones fortement ravinées, la surface doit être lissée à l'aide d'outils manuels. Les zones peu érodées doivent être remaniées le moins possible et la végétation peut s'établir de la manière suivante :

- Des ballots de foin ou de géotextiles tissés peu serrés, dans lesquels les racines de plantes stolonifères (rampantes ou courantes) ont été mélangées à une mixture de sols et stériles, sont placés en travers des ravineaux à 5 m d'intervalle. Ceci permet de réduire la vitesse des eaux de ruissellement et empêche l'érosion jusqu'à l'installation de la végétation.
- Un matelas de foin, de préférence ramassé dans un endroit contenant diverses espèces locales de fourrage, est répandu sur le dépôt à raison de 3 t/ha.
- De la chaux agricole et des engrais superphosphatés sont répandus sur la surface des stériles à un taux approprié, généralement 7,5 t/ha et 300 kg/ha respectivement.
- Le lessivage de la surface est commencé. L'arrosage par aspersion s'effectue à un débit juste inférieur à celui de l'infiltration de surface. Généralement, l'aspersion s'effectue trois fois par jour pendant 20 minutes environ. Elle est réduite en cas de ruissellement.
- Le mélange de graines est ensuite préparé et semé. Les graines de légumineuses sont mélangées à une quantité appropriée de bactéries « rhizobium », assurant la fixation de l'azote atmosphérique. Toutes les graines sont ensuite mélangées. La chaux est utilisée pour faciliter la germination. Environ 200 kg

10.3. ESTABLISHMENT OF VEGETATION

The surfaces of the sides of a tailings deposit may be hard or steep (or both) and there will be an almost total lack of plant nutrients in the tailings. The surface material may also be acid with pH values varying from 5 down to 2 or less. Any acidity may react with other minerals in the tailings to form salts which migrate to the outer surface by capillary water movement under evaporation gradients. At the surface the water evaporates, leaving behind the salts and a concentration of acid. This is a very hostile environment for plant growth and the tailings must be leached and conditioned to support plant growth before vegetation can be established successfully.

10.3.1. Establishing vegetation on the outer slopes of a tailings deposit

If the material is acidic, it is conditioned to support plant growth by the application of lime to raise the pH, various fertilizers to provide nutrients, and by the application of water to leach accumulated salts and acids on the surface down into the interior of the deposit. As the interior is often alkaline, the acid is neutralized and the salts relatively immobilized.

Natural leaching by rainfall infiltration often occurs on the top of a deposit but on the sides it is necessary to leach the tailings by applying water as a fine mist-spray by means of an irrigation system.

On sides where deep erosion gullies have formed, the surface is smoothed off with the use of hand tools but where the surface is not badly eroded it is disturbed as little as possible and vegetation is established in the following manner :

- Bales of hay or loosely woven geotextile in which stoloniferous (creeping or running) grass roots have been mixed together with a mixture of tailings and soil, are placed across erosion gullies at about 5 m intervals. These reduce the velocity of run-off water down the gullies and prevent erosion until the vegetation is established.
- A mulch of hay preferably cut in an area where there is a variety of local grasses is spread at a rate of 3 t/ha.
- Agricultural lime and superphosphate fertilizer is applied to the surface of the tailings at a suitable rate, usually 7,5 tons/ha and 300 kg/ha respectively.
- Leaching of the surface is now started. Water is sprayed above the surface as a mist at a rate that is just below the rate of infiltration into the tailings surface. This usually means that the sprays are turned on for about 20 minutes three times a day. If any run-off is noticed the application time is reduced.
- The seed mix is next prepared and sown. Legume seeds are inoculated with the appropriate rhizobium bacteria to assist atmospheric nitrogen fixation and all the seeds are then mixed together. Lime is used as a distribution and

de chaux agricole par hectare est mélangé aux graines et l'ensemble est ensuite semé soigneusement à la volée.

- Quatre jours après le semis, l'engrais est déposé en quantité appropriée (habituellement 300 kg/ha) et l'application est répétée lorsque les plants ont sorti leur troisième niveau de feuilles - soit environ trois semaines après semence.
- Le lessivage est poursuivi jusqu'à ce qu'une couverture satisfaisante d'herbage, contenant un fort pourcentage de légumineuses, se soit installée. L'arrosage est ensuite progressivement diminué. Lorsqu'aucun lessivage n'a été effectué pendant 2 mois, le système de lessivage est enlevé si aucune dégradation de la végétation n'apparaît en surface.

10.3.2. Végétalisation de la surface des dépôts de stériles

La végétalisation de la surface du dépôt de stériles peut être effectuée avec la méthode « dryland » pendant la période climatique favorable de l'année. En principe, aucun lessivage artificiel n'est nécessaire.

Après achèvement des dispositifs de contrôle de l'eau sur la surface du dépôt, le fond des bassins est labouré une fois par an pendant au moins deux ans. Ceci est généralement fait juste avant la période des vents.

Des plots d'essais, d'environ 10 m × 10 m, sont réalisés sur la surface du dépôt, à raison d'un plot pour 25 ha. Ces plots sont chaulés, fertilisés puis ensemencés avec un mélange de graines sélectionnées. Lorsque les plots d'essai sont réussis, l'ensemble de la surface du dépôt est engazonné. En cas d'échec, le plot est labouré à nouveau et un nouvel essai est recommencé la saison suivante. La végétalisation s'effectue de la manière suivante :

- De la chaux agricole, à raison de 7,5 t/ha, et des superphosphates (10,5 %), à raison de 600 kg/ha, sont répandus en surface, puis enfouis jusqu'à 0,1 m de profondeur au moyen d'une charrue à disques.
- Pendant la période climatique favorable, le mélange de graines est préparé puis semé avec les équipements agricoles classiques. Il est ensuite roulé avec un rouleau du type « Cambridge » permettant de réaliser une surface ondulée et d'établir un bon contact sol/graines.
- Quatre jours après le semis, l'engrais est déposé à raison de 300 kg/ha. Cette application est répétée en conditions climatiques favorables lorsque le plant a atteint le troisième niveau de feuilles.
- Une fois la végétation bien installée, soit environ 5 semaines après la germination, un engrais contenant de l'urée est mis en place à raison de 50 kg/ha. Cette application est répétée environ 10 jours plus tard. Ces deux applications doivent s'effectuer en période de conditions climatiques favorables.
- Le mélange de graines utilisé et sa fréquence d'application sont les mêmes que pour la végétalisation des talus du dépôt, avec, en complément, des graines d'arbres.

germination aid. About 200 kg of agricultural lime per hectare is thoroughly mixed with the seed which is then broadcast carefully over the area by hand.

- Four days after sowing, fertilizer is applied at a suitable rate (usually 300 kg/ha) and the application is repeated when the seedlings reach the third leaf stage – about three weeks after sowing.
- Leaching is continued until a good mature grass cover, with a high percentage of legumes, has been established. Then a “tempering” process is started, during which the application of water is gradually decreased. After no leaching has taken place for a period of at least two months the leaching system is removed if no signs of stress are apparent in the vegetation.

10.3.2. Establishing vegetation on the top surfaces of tailings deposits

Vegetation can be established on the tops of tailings deposits using dryland methods during favourable weather conditions. Normally no artificial leaching is necessary.

After water control measures have been completed on the top, the floors of the paddocks are ridge ploughed once per annum for at least two years. This is usually done just before the onset of any seasonally windy period.

Trial plots, approximately 10 m by 10 m in size, are established on the top at a density of about one plot for every 25 ha. These plots are limed, fertilized and sown using a selected seed mix. Where the plots are successful, the total top is vegetated. Where a trial plot is not successful, the site is re-ridged and the trial plot repeated the following season. The method of vegetating is as follows :

- Agricultural lime at 7,5 t/ha and superphosphate (10.5 %) at 600 kg/ha is applied and disked into the surface to a depth of 100 mm.
- During favourable weather conditions the seed mix is prepared and broadcast over the area using conventional agricultural equipment. It is then rolled with a “ Cambridge ” type land roller to corrugate the surface and to provide a good seed/soil contact.
- Four days after sowing, fertilizer is applied at a rate of 300 kg/ha. This application is repeated during favourable weather conditions when the seedlings reach the third leaf stage.
- Once the vegetation is well established, about four to five weeks after germination, urea fertilizer is applied at a rate of 50 kg/ha and the application is repeated about ten days later. Both applications should take place during favourable weather conditions.
- The seed mix used and the rate of application is the same as is used on the sides of the deposit with the addition of some tree seeds

10.3.3. Le mélange de graines

Le mélange est constitué de graines d'espèces poussant l'hiver et l'été, d'herbage en touffe, de plantes à stolons (pour empêcher l'érosion de surface) et de légumineuses pour fournir l'azote et réduire l'entretien à long terme. Il contient également des espèces poussant rapidement pour empêcher le plus tôt possible l'érosion, et un certain nombre de plantes à racines profondes pouvant puiser l'humidité présente en profondeur dans les stériles. Des graines de colza sont également utilisées, car le colza est un bon indicateur d'une déficience en phosphates ou d'un retour vers un milieu acide.

10.3.4. En surface du dépôt

Le seul entretien généralement nécessaire pour la végétation en surface du dépôt est l'exécution annuelle, par labourage, d'un pare-feu de 5 m de large en périphérie et sur le dépôt de façon à délimiter des parcelles d'environ 5 ha.

10.3.5. Sur les talus du dépôt

Un entretien par engrais est utilisé pour favoriser la pousse d'espèces herbacées stolonifères permanentes par opposition à celles poussant rapidement et très touffues. Les premières assurent une bonne couverture du sol, demandent peu d'éléments nutritifs, ne créent pas de risque important vis-à-vis du feu, et laissent des surfaces non ombragées où une végétation herbacée endémique locale peut se développer lorsque les conditions sont favorables. Les secondes réalisent une couverture végétale laissant des espaces non végétalisés entre les touffes, qui s'érodent s'ils sont situés sur de fortes pentes, et elles forment de l'ombre sur des zones où des plantes herbacées locales pourraient se développer. Elles demandent un sol plus riche pour pousser et présentent une importante biomasse au-dessus du sol, ce qui constitue un risque important vis-à-vis du feu.

Ces plantes sont introduites dans le mélange de graines parce qu'elles permettent l'établissement rapide d'une couverture végétale, et ont un bon taux de germination dans des conditions particulièrement défavorables, ce qui est le cas des talus des dépôts de stériles. Pour favoriser le développement de certaines espèces, l'engrais est déposé manuellement sur ces seuls espaces, à raison d'un taux équivalent de 350 kg/ha par an sur trois ans.

10.3.3. The seed mix

The mix includes summer and winter growing species, tufted grasses and stoloniferous (creeping) varieties (to prevent erosion of the surface) and legumes to provide nitrogen and reduce future maintenance requirements. Fast growing varieties are included to provide early erosion protection and there are a number of deep rooted plants to take advantage of the moisture that is present below the tailings surface. Rape is included in the seed mix as an indicator plant which gives early warning of phosphate deficiencies or the return of acid conditions.

10.3.4. On the top of the deposit

The only aftercare usually necessary for vegetation on the top of a tailings deposit is an annual disking of 5 m wide fire breaks around the top perimeter of the dam and across the top so that it is divided into paddocks of about 5 ha in area.

10.3.5. On the side of the deposit

Maintenance fertilizer is used to encourage growth of the permanent, stoloniferous type grasses as opposed to the rapid growing, canopy type of grass. The former provide a good ground cover, have a low nutrient requirement, do not create a major fire hazard and leave unshaded patches where local endemic grasses can encroach when conditions are right. The latter provides a canopy cover with unvegetated spaces between tufts that erode on a steep slope, they shade areas where local grasses could establish. They require a relatively higher level of fertility to grow successfully and have a large biomass above ground, which is a fire hazard.

These grasses are included in the seed mix because they provide an early cover and can be relied on to germinate successfully in the harsh conditions found on the side of a tailings deposit. To encourage desirable grasses, fertilizer is applied selectively by hand, to the desired grasses only, at a rate equivalent to 350 kg/ha annually for three years, after the initial vegetation has been established.

11. BIBLIOGRAPHIE / BIBLIOGRAPHY

Chapitres 2 et 3 / Chapters 2 and 3

1. CIGB. Bulletin 44a (1989). Bibliographie - Barrages et Dépôts de Stériles Miniers et Industriels / ICOLD Bulletin 44a (1989). Bibliography - Mine and Industrial Tailings Dams and Dumps.
2. CIGB. Bulletin 45 (1982). Manuel des Barrages et Dépôts des Stériles / ICOLD Bulletin 45 (1982). Manual on Tailings Dams and Dumps.
3. (South African) Chamber of Mines (1983). Handbook of Guidelines for Environmental Protection.
4. WATES, J. A. and BRINK, D. (Editors) (1987). Mining and Industrial Waste Management. Int. Conf. Johannesburg. Selected papers.
5. (South African) Chamber of Mines (1991). Aide Mémoire for Environmental Management Programme Reports for Proposed Prospecting or Mining Projects.
6. EURENIUS, J. (1992 draft). Environmental Aspects for Tailings Dams. Draft ICOLD Publication.
7. BLIGHT, G. E. (1994). Environmentally Acceptable Tailings Dams. Proc. 1st Int. Conf. on Environmental Geotechnics, Edmonton, Alberta, Canada.
8. ANTHONY, M. (1993). Environmental Compliance Processes Mining Environmental Management. June 1993. The Mining Journal Ltd.

Chapitre 5 / Chapter 5

9. WISHMEYER et al. (1978)
10. ISRAELSSON (1980)

Chapitre 7 / Chapter 7

11. AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P., AACHIB, M., RICHARD, J. F., TREMBLEY, L. and BUSSIÈRE, B. (1994). Cover technology for acidic tailings: Hydrological properties of milling wastes used as capillary barrier. Proc. 1st Int. Congr. on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canada. pp. 427-432.
12. AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P., BUSSIÈRE, B. and AACHIB, M. (1993). Geofine'93. Arnould, Barres & Cômé (Eds) Balkema, Rotterdam. pp. 299-307.

13. BROMAN, P. G. and GÖRANSSON, T. (1994). Decommissioning of tailings and waste rock areas at Stekenjokk, Sweden. Proc. 3rd Int. Conf. on Abatements of Acidic Drainage. Pittsburg, P.A. pp. 32-40.
14. LANSDOWN, G.L.P. (1992). The effect of solids content variation on various properties and tailings storage costs for tailings from two mills for a gold mine in Nevada. MSc (Eng) Thesis, Witwatersrand University, Johannesburg.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : avril 1996
N° 18224
ISSN 0534-8293
Couverture : Loïc Dronneau

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>