

**MANUAL  
ON TAILINGS DAMS  
AND DUMPS**

**MANUEL  
DES BARRAGES  
ET DÉPÔTS DES STÉRILES**



***MANUAL  
ON TAILINGS DAMS  
AND DUMPS***

**MANUEL  
DES BARRAGES  
ET DÉPÔTS DES STÉRILES**



Rapport préparé par MM. G.H.H. Legge, G. L'Hériteau, A.D.M. Penman et W.A. Wahler pour le Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels (CIGB) et approuvé à la 50<sup>e</sup> Réunion Exécutive, Rio de Janeiro, avril 1982

Traduction française par Ph. Mendes, avec la collaboration de P. Bacave et G. L'Hériteau

*Report prepared by Messrs G.H.H. Legge, G. L'Hériteau, A.D.M. Penman and W.A. Wahler for the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams and approved by the 50th Executive Meeting, Rio de Janeiro, April 1982*

*French translation by Ph. Mendes, revised by P. Bacave and G. L'Hériteau.*

**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.

---

## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
1. EMPLACEMENT DES BARRAGES
  2. EXPLORATION DES SITES
  3. CONCEPTION
  4. CONSTRUCTION ET EXPLOITATION
  5. CLOTURE ET ABANDON

GLOSSAIRE

SYMBOLES

---

## CONTENTS

---

- INTRODUCTION
1. LOCATION OF DAMS
  2. SITE INVESTIGATION
  3. DESIGN
  4. CONSTRUCTION AND OPERATION
  5. CLOSURE AND ABANDONMENT

GLOSSARY

SYMBOLS

---

## TABLE DES MATIÈRES

---



---

## TABLE OF CONTENTS

---

<p>INTRODUCTION</p> <p>1. EMPLACEMENT DES BARRAGES</p> <p style="padding-left: 20px;">1.1. Considérations générales</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2. Cas de décharges</p> <p style="padding-left: 20px;">1.3. Cas des retenues</p> <p>2. EXPLORATION DES SITES</p> <p style="padding-left: 20px;">2.1. Généralités et convenances des sites</p> <p style="padding-left: 20px;">2.2. Propriétés et caractéristiques des stériles miniers et industriels</p> <p style="padding-left: 40px;">2.2.1. Propriétés</p> <p style="padding-left: 40px;">2.2.2. Caractéristiques mécaniques</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3. Propriétés et caractéristiques des terrains de fondation et d'emprunt</p> <p style="padding-left: 20px;">2.4. Exploration géotechnique</p> <p>3. CONCEPTION</p> <p style="padding-left: 20px;">3.1. Introduction</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.1. Généralités</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.2. Qualifications du concepteur</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.3. Caractéristiques des barrages de stériles</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.4. Mise en dépôt des stériles miniers</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.5. Données conceptuelles requises</p> <p style="padding-left: 20px;">3.2. Hydrologie et hydraulique</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.1. Généralités</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.2. Données de base</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.1. Envergure</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.3. Danger potentiel</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.3. Données de conception</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.3. Emmagasinement</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.4. Décharge</p> <p style="padding-left: 20px;">3.3. Concept</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.1. Généralités</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.2. Tonnages</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.3. Choix des emplacements</p>	<p>12/13 INTRODUCTION</p> <p>1. LOCATION OF DAMS</p> <p style="padding-left: 20px;">1.1. General</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2. Dumps</p> <p style="padding-left: 20px;">1.3. Impoundments</p> <p>2. SITE INVESTIGATION</p> <p style="padding-left: 20px;">2.1. Site Selection</p> <p style="padding-left: 20px;">2.2. Properties and Characteristics of Mining and Industrial Wastes</p> <p style="padding-left: 40px;">2.2.1. Properties</p> <p style="padding-left: 40px;">2.2.2. Mechanical Characteristics</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3. Properties and Characteristics of Foundations and Borrow Areas</p> <p style="padding-left: 20px;">2.4. Geotechnical Investigations</p> <p>58/59 3. DESIGN</p> <p style="padding-left: 20px;">3.1. Introduction</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.1. General</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.2. Designer Qualifications</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.3. Tailings Dam Characteristics</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.4. Mine Refuse Disposal</p> <p style="padding-left: 40px;">3.1.5. Basic Design Data Requirements</p> <p style="padding-left: 20px;">3.2. Hydrology and Hydraulics</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.1. General</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.2. Input</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.1. Size</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.2. Hazard Potential</p> <p style="padding-left: 60px;">3.2.2.3. Design Data</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.3. Storage</p> <p style="padding-left: 40px;">3.2.4. Outflow</p> <p style="padding-left: 20px;">3.3. Conceptual Design</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.1. General</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.2. Tonnages Involved</p> <p style="padding-left: 40px;">3.3.3. Site Selection</p>
---	--

---

3.3.4. Choix du type de remblai	3.3.4. Selection of Type of Dam Embankment
3.3.4.1. Méthode amont	3.3.4.1. Upstream Method
3.3.4.2. Méthode de l'axe central	3.3.4.2. Centreline Method
3.3.4.3. Méthode aval	3.3.4.3. Downstream Method
3.3.4.4. Barrage de type conventionnel, à matériaux d'emprunt	3.3.4.4. Borrow Material, Water Retaining Type Dam
3.3.5. Système de transport des boues	3.3.5. Slurry Transport System
3.3.5.1. Ecoulement par gravité	3.3.5.1. Gravity Flow
3.3.5.2. Pompage	3.3.5.2. Pumping
3.3.6. Systèmes de contrôle de l'eau	3.3.6. Water Control Systems
3.3.6.1. Percolation verticale – généralités	3.3.6.1. Vertical Seepage-General
3.3.6.2. Dérivation de l'eau	3.3.6.2. Water Diversion
3.3.6.3. Revêtements de retenues	3.3.6.3. Pond Liners
3.3.6.4. Piézomètres	3.3.6.4. Piezometers
3.3.6.5. Récupération de l'eau	3.3.6.5. Water Recovery
3.3.7. Plans d'abandon	3.3.7. Abandonment Plans
3.3.8. Construction	3.3.8. Construction Plans
3.3.9. Plans d'exploitation	3.3.9. Operating Plans
3.3.10. Revue de la conception, de la construction et de l'exploitation	3.3.10. Review of Design, Construction and Operation
3.4. Fondations	3.4. Foundations
3.4.1. Fondations	3.4.1. General
3.4.2. Tassements	3.4.2. Settlement
3.4.2.1. Fondations rocheuses	3.4.2.1. Rock Foundations
3.4.2.2. Fondations compressibles	3.4.2.2. Compressible Foundations
3.4.2.3. Résistance	3.4.2.3. Strength
3.4.3. Percolations	3.4.3. Seepage
3.4.4. Séismicité	3.4.4. Seismicity
3.4.5. Préparation des fondation et appuis	3.4.5. Foundation and Abutment Preparation
4. CONSTRUCTION ET EXPLOITATION	4. CONSTRUCTION AND OPERATION
	138/139
4.1. Introduction	4.1. Introduction
4.2. Description des techniques de mise en place	4.2. Description of Tailings Deposition Techniques

4.2.1. Généralités	4.2.1. General
4.2.1.1. Mise en place – technique amont	4.2.1.1. Deposition by Upstream Technique
4.2.1.2. Mise en place – technique aval	4.2.1.2. Deposition by Downstream Technique
4.2.1.3. Mise en place – technique de l'axe central	4.2.1.3. Deposition by Centerline Technique
4.2.2. Construction par cyclo- nage	4.2.2. Wall Building by Cyclone Depositions
4.2.2.1. Objectifs de cy- clonage	4.2.2.1. Cycloning Objectives
4.2.2.2. Techniques de cyclonage et leur contrôle	4.2.2.2. Cyclone Depo- sition Techniques and their Control
4.2.2.3. Cyclonage par la technique amont	4.2.2.3. Cycloning by Upstream Me- thods
4.2.2.4. Cyclonage par la méthode aval	4.2.2.4. Cycloning by Downstream Me- thods
4.2.2.5. Cyclonage par séquences suc- cessives amont et aval	4.2.2.5. Cycloning by Successive Up- stream and Downstream Sequences
4.2.2.6. Cyclonage par le centre	4.2.2.6. Cycloning by Centerline De- position
4.2.2.7. Techniques de cyclonage ponc- tuel	4.2.2.7. Central Cyclone Stations Methods
4.2.3. Techniques de mise en place par jets multiples (spigots)	4.2.3. Spigot Discharge Wall Building Techniques
4.2.3.1. Ligne principale d'apport laissée au niveau du ter- rain	4.2.3.1. Main Delivery Line Left on the Ground Level
4.2.3.2. Ligne principale levée périodique- ment	4.2.3.2. Main Delivery Line Periodically Lifted
4.2.3.3. Directives pour l'exploitation	4.2.3.3. Guidelines for Operation
4.2.4. Système à enclos multi- ples (paddock)	4.2.4. Paddock System
4.2.5. Mise en place des stériles par moyens mécaniques	4.2.5. Mechanized Placing of Tailings
4.2.5.1. Teneur en eau	4.2.5.1. Moisture Content



4.2.5.2. Systèmes mécaniques de déversement	4.2.5.2. Mechanical Dumping Systems
4.2.5.3. Construction de remblais par moyens mécaniques	4.2.5.3. Mechanical Wall Building
4.2.6. Remblais de stériles construits avec de la terre ou des enrochements	4.2.6. Tailings Dam Walls Built with Earthfill or Rockfill
4.2.6.1. Remblais imperméables	4.2.6.1. Impervious Walls
4.2.6.2. Remblais perméables	4.2.6.2. Pervious Walls
4.2.6.3. Construction à la hauteur finale	4.2.6.3. Construction to Final Height
4.2.6.4. Construction de remblais par étapes	4.2.6.4. Stage Construction of the Wall
4.2.6.5. Mise en place de stériles en arrière de remblais de terre ou enrochements	4.2.6.5. Placing of Tailings Behind Earthfill or Rockfill Walls
4.2.6.6. Contreforts ou recharges rocheuses	4.2.6.6. Rock Buttresses
4.2.6.7. Remblais d'amorce	4.2.6.7. Starter Walls
4.2.7. Déchargement central de boues de stériles épaissies	4.2.7. Central Discharge of Thickened Tailings Slurry
4.2.8. Techniques diverses	4.2.8. Miscellaneous Techniques
4.2.8.1. Mise en dépôt dans la mer ou dans un lac	4.2.8.1. Disposal into Sea or Lake
4.2.8.2. Mise en dépôt souterrain	4.2.8.2. Underground Disposal
4.3. Remblais de pied et d'amorce	4.3. Toe Walls and Starter Dams
4.3.1. Définitions	4.3.1. Definitions
4.3.2. Remblais de pied – exigences de construction	4.3.2. Toe Walls – Construction Requirements
4.3.3. Barrages d'amorce – exigences de construction	4.3.3. Starter Dams – Construction Requirements
4.3.4. Nettoyage du terrain	4.3.4. Ground Clearing
4.3.5. Matériaux de construction	4.3.5. Materials of Construction
4.3.6. Hauteur et largeur	4.3.6. Height and Width
4.4. Filtre drainant	4.4. Filter Drainage
4.4.1. Localisation et implantation	4.4.1. Location and Alignment

4.4.2. Choix des matériaux	4.4.2. Selection of Materials
4.4.3. Mise en place des matériaux	4.4.3. Placing of Materials
4.4.4. Recouvrement de drains par des stériles	4.4.4. Covering of Drains with Tailings
4.4.5. Entretien des drains	4.4.5. Maintenance of Drains
4.5. Systèmes d'évacuation	4.5. Effluent Systems
4.5.1. Définitions	4.5.1. Definitions
4.5.2. Exigences de construction	4.5.2. Construction Requirements
4.5.3. Exigences d'exploitation	4.5.3. Operating Requirements
4.5.4. Gestion de la retenue et de la plage	4.5.4. Pond and Beach Management
4.5.5. Entretien	4.5.5. Maintenance
4.6. Surveillance des barrages de stériles pendant la construction	4.6. Monitoring of Tailings Dams During Construction
4.6.1. Mesures de correction	4.6.1. Predeposition Remedial Measures
4.6.2. Surveillance de la stabilité et de la percolation	4.6.2. Monitoring for Stability and Seepage
4.6.2.1. Inspections	4.6.2.1. Inspections
4.6.2.2. Surfaces de percolation	4.6.2.2. Seepage Surfaces
4.6.2.3. Percolation à travers les revêtements	4.6.2.3. Seepage Through Liners
4.6.2.4. Profils de résistance et densité relative	4.6.2.4. Profiles of Strength and Relative Density
4.6.2.5. Surveillance par levé topographique	4.6.2.5. Monitoring by Survey
4.6.3. Enregistrements	4.6.3. Records
4.6.3.1. Généralités	4.6.3.1. General
4.6.3.2. Tonnage livré	4.6.3.2. Delivered Ton-nages
4.6.3.3. Enregistrements volumétriques et de niveau.	4.6.3.3. Volumetric/Level Records
4.6.3.4. Enregistrements des débits (effluent)	4.6.3.4. Effluent Records
4.6.3.5. Construction de remblais	4.6.3.5. Wall Building
4.6.4. Entretien général	4.6.4. General Maintenance
4.6.4.1. Tranchées à effluents	4.6.4.1. Effluent Trenches
4.6.4.2. Enclos de ruissellement (runoff paddocks)	4.6.4.2. Runoff Paddocks

4.6.4.3. Systèmes de contrôle d'effluents	4.6.4.3. Effluent Control Systems
4.6.4.4. Routes d'accès	4.6.4.4. Access Roads
4.6.4.5. Conduites d'amenées (pipeline)	4.6.4.5. Pipelines
4.6.4.6. Valves	4.6.4.6. Valves
4.7. Mesures correctrices	4.7. Remedial Measures
4.7.1. Généralités	4.7.1. General Problems
4.7.2. Evaluation de la sécurité des barrages de stériles	4.7.2. Appraisal of the Safety of Existing Tailings Dams
4.7.2.1. Inspection	4.7.2.1. Inspection
4.7.2.2. Mesures	4.7.2.2. Measurements
4.7.2.3. Analyse	4.7.2.3. Analysis
4.7.3. Mesures de précaution ou d'amélioration	4.7.3. Precautionary and Remedial Measures
<b>5. CLOTURE ET ABANDON</b>	<b>221/222 5. CLOSURE AND ABANDONMENT</b>
5.1. Généralités	5.1. General
5.2. Réglementation	5.2. Regulations
5.2.1. Règlements en Grande-Bretagne	5.2.1. Regulations in Great Britain
5.2.2. Règlements en d'autres pays	5.2.2. Regulations in Other Countries
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>232/234 GLOSSARY</b>
<b>SYMBOLES</b>	<b>237 SYMBOLS</b>

---

## LISTE DES FIGURES

---

NUMERO	TITRE
1-1	Types de remblais de résidus miniers
1-2	Retenue à deux digues en travers de la vallée
3-1	Méthodes de construction des remblais de stériles miniers et industriels – méthode de construction en amont
3-2	Méthode de construction des remblais de stériles miniers – recharge
3-3	Méthode de construction des remblais de stériles miniers et industriels – méthode de construction avec axe central
3-4	Méthodes de construction des remblais de stériles miniers et industriels – méthode de construction en aval
3-5	Barrage de type conventionnel
4-1	Bilan hydrique type d'une exploitation hydrocyclone/barrage de stériles (eau du procédé seulement)
4-2	Cyclonage par la méthode amont
4-3	Cyclonage par la méthode aval
4-4	Cyclonage par dépôts successifs amont et aval
4-5	Cyclonage par la méthode centrale
4-6	Méthode de construction à lances
4-7	Système de lances extensibles
4-8	Système de lances prolongées suivant le profil d'un barrage
4-9	Système de lances avec embranchement extensible
4-10	Système de lances : levage du distributeur principal
4-11	Système d'enclos : construction aval
4-12	Système d'enclos : construction centrale
4-13	Système d'enclos : construction amont
4-14	Système d'enclos : tassement insuffisant du remblai extérieur
4-15	Système d'enclos : tassement total du remblai extérieur par engins mécaniques
4-16	Mise en place mécanique : cône de stériles entouré
4-17	Remblais de terre ou d'encrochement : remblai imperméable
4-18	Remblais de terre ou d'encrochement : remblai perméable
4-19	Remblais de terre ou d'encrochement : construction par étapes
4-20	Remblais de terre ou d'encrochement : mise en place de résidus rocheux excédentaires
4-21	Remblais de terre ou d'encrochement : dépôts des stériles contre le remblai
4-22	Piézomètres pour dépôts de stériles
4-23	Nappe type de percolation déterminée au moyen de piézomètres
4-24	Puits de contrôle installés sur la périphérie d'un barrage de stériles revêtu
4-25	Mesures correctrices : réaménagement d'une zone d'effondrement
4-26	Mesures correctrices : drains perforés
4-27	Mesures correctrices : addition d'une recharge de stériles sur drain en tapis
4-28	Mesures correctrices : addition d'une recharge encrochement-filtre
4-29	Mesures correctrices : réduction de pente par berme ou retrait
4-30	Mesures correctrices : réduction de pente au moyen d'une recharge
4-31	Mesures correctrices : mauvaise construction d'une recharge en encrochement

---

## LIST OF FIGURES

---

NUMBER	TITLE
1-1	Types of Refuse Disposal Structures
1-2	Cross-valley Impoundment with Two Impounding Dikes
3-1	Mine, Mill or Plant Refuse Embankment Construction Methods – Upstream Construction Method
3-2	Mine, mill or plant refuse embankment construction methods – Surcharge
3-3	Mine, Mill or Plant Refuse Embankment Construction Methods – Centreline Construction Method
3-4	Mine, Mill or Plant Refuse Embankment Construction Methods – Downstream Construction Method
3-5	Water Dam Embankment Type
4-1	Typical Cyclone & Tailings Dam Water Balance (Process Water Only)
4-2	Cycloning by upstream method
4-3	Cycloning by downstream method
4-4	Cycloning by successive upstream and downstream deposition
4-5	Cycloning by centreline method
4-6	Spigot method of construction
4-7	Spigot system with extendable spigot lines
4-8	Spigot system with extended spigot lines following dam profiles
4-9	Spigot system with extendable branch line
4-10	Spigot system : Lifting of main delivery line
4-11	Paddock system : Downstream construction
4-12	Paddock system : Centreline construction
4-13	Paddock system : Upstream construction
4-14	Paddock system : Outer wall inadequately compacted
4-15	Paddock system : Full compaction of outer wall by machines
4-16	Mechanical Placing : Contained cone of tailings
4-17	Earth and Rockfill Walls : Impervious wall
4-18	Earth and Rockfill Walls : Pervious wall
4-19	Earth and Rockfill Walls : Stage construction of wall
4-20	Earth and Rockfill Walls : Excess waste rock placement on wall
4-21	Earth and Rockfill Walls : Deposition of tailings against wall
4-22	Standpipe piezometers suitable for installing in tailings deposits
4-23	Typical Seepage Surface determined by means of Standpipe Piezometers
4-24	Monitoring Walls installed around the perimeter of a Lined Residue Dam
4-25	Remedial Measures : Reinstatement of major gully or slide area
4-26	Remedial Measures : Perforated Pipe Drains
4-27	Remedial Measures : Addition of Under-Drained Tailings Buttress
4-28	Remedial Measures : Addition of Filtered Rock Buttress
4-29	Remedial Measures : Flattening slope by forming a Berm or Stepping Back
4-30	Remedial Measures : Flattening slope by adding a Toe Weight
4-31	Remedial Measures : Incorrect construction of Rockfill Buttress

---

---

## INTRODUCTION

---

Les *barrages de stériles* sont constitués soit de résidus industriels, soit de stériles miniers, soit encore de terre ou enrochement, et conçus dans le but de retenir les boues ou les eaux boueuses résidus d'installations minières ou industrielles. Les *dépôts de stériles*, par contre, sont des stockages aménagés par remblai sec ou hydraulique mais qui ne sont pas appelés à retenir des quantités significatives d'eau. Barrages et dépôts ont depuis longtemps été conçus par des moyens empiriques, avec des succès fort mitigés.

La rupture des barrages d'Aberfan au Pays de Galles (dépôt de stériles houillers) dans les années soixante et de Buffalo Creek en Virginie orientale aux Etats-Unis (décharge de stériles miniers) en 1972, chacune responsable de la mort de plus de 100 personnes qui n'étaient pas des mineurs, ont attiré l'attention de l'opinion publique mondiale sur les dangers présentés par certains de ces ouvrages. Des catastrophes de moindre envergure, n'impliquant que quelques pertes de vies parmi les mineurs ou ne causant que des dommages matériels ont toujours été relativement courantes, mais généralement portées au compte des risques professionnels.

La prise de conscience des risques associés à ces ouvrages a conduit au besoin d'en améliorer la sécurité, notamment par une conception et une construction plus rigoureuses. Le fait que tous les ouvrages de retenue d'eau soient assimilés à des "barrages", quel que soit le matériau dont ils sont constitués et abstraction faite de la méthode de construction utilisée, a conduit la CIGB à se pencher sur le problème puis à former, en 1976, lors de la 44<sup>e</sup> Réunion Exécutive de Mexico, au Mexique, le Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels qui a établi ce Manuel. Bien que n'étant pas directement du ressort de la CIGB, les dépôts de stériles figurent ici parce que la technologie utilisée pour leur conception et leur construction se rapproche beaucoup de celle des barrages. De plus, un grand nombre de dépôts de stériles font office de barrages pendant leur construction et tous les barrages deviennent des dépôts quand leur retenue est remplie de stériles.

Les stériles miniers sont ce qui reste après que les minéraux ayant une valeur marchande aient été extraits du minerai. En général, le minerai (ou minerai dur) est broyé dans un concasseur à la grosseur d'un sable fin puis les matériaux ayant une valeur marchande sont récupérés sous forme de "produit enrichi", par flottation ou par traitement chimique. Les résidus qui n'ont pas de valeur marchande sont appelés "stériles". Ils se présentent alors généralement sous la forme d'une boue et sont habituellement transportés tels quels au dépôt, formule la plus pratique et la moins coûteuse. La retenue de stériles retient la boue pendant la sédimentation, phase pendant laquelle les stériles cessent d'être en suspension pour se déposer au fond de la retenue. On a recours à un système de décantation des boues clarifiées de la retenue, soit pour en disposer, soit pour les réutiliser ou les récupérer.

Dans le cas de houille provenant de filons peu épais, il y a lieu d'enlever la partie non combustible du mélange recueilli à la surface d'abord par un procédé de séparation utilisant un milieu dense afin d'enlever les résidus grossiers, puis par lavage afin d'enlever les parties fines. Les résidus grossiers servent généralement pour les barrages et les décharges alors que les boues fines sont retenues derrière le barrage de stériles où elles peuvent se déposer et se clarifier. Le broyage et le rinçage nécessitent de grandes quantités

---

## INTRODUCTION

---

*Tailings dams* are dams constructed of: 1) mill tailings, 2) mine wastes, or 3) earth or rock fill; for the retention of tailings slurry or slurry water for reclamation. *Tailings dumps* are tailings disposal structures constructed by dry or hydraulic fill means but which do not impound significant quantities of water. Both types of structures have long been designed by empirical means with less than satisfactory performance.

The failure of the Aberfan Coal Waste Dump in Wales, England in the sixties and the Buffalo Creek Coal Waste Dam in West Virginia, USA in 1972 however focused the world's attention on the potential hazard created by some of these structures because each of these failures has been responsible for the death of more than 100 people who were not miners. Smaller scale failures killing only a few miners, or doing only environmental damage had previously been relatively common, but had usually been dismissed simply as an occupational hazard.

With the recognition of the potentially great hazard that could be created by these structures came the need for better design and construction to increase their safety. Recognition of water retention structures as "dams" regardless of the material or method of construction led to ICOLD's interest, and the formation in 1976 in Mexico City, Mexico, during the 44th Executive Meeting, of the ICOLD Committee on Mine and Industrial Tailings Dams which compiled this Manual. Dumps, while not the direct concern of ICOLD, are included in this Manual because much of the technology involved in their design and construction is similar to, or an adaptation of that used in the design of the dams. Additionally many dumps become dams at some time during their construction, and all dams become dumps when their impoundments are filled with tailings.

Tailings are the waste mineral remaining after the valued (values) minerals have been removed from the ore. Typically the ore (hardrock ore) is crushed to a fine sand consistency at a concentrator mill, and "values" are removed by floatation or chemical processes in the form of "concentrates". The valueless mineral remaining at the "tail" end of the process is referred to as tailings. Tailings are generally in slurry form at the end of the processing operation and for convenience and economy are generally transported to the tailings disposal structure as a slurry. It is the function of the tailings impoundment to retain the slurry during the process of sedimentation during which time the tailings go out of suspension and fall to the bottom of the impoundment. A decant system is used to remove (decant) the clarified slurry water from the impoundment either for disposal or for re-use or "reclamation".

With coal which is mined from thin seams, it is necessary to remove the non combustible detritus from the material brought to the surface by a heavy media process to remove the coarse waste, and a washing process to remove the fine waste. The coarse waste material is generally used for dump or dam building, and the fine sludge is impounded for sedimentation and water clarification behind the tailings dam. Large amounts of water are used in both the milling and washing processes. This water cannot

d'eau. Avant de déverser cette eau dans un cours d'eau, il importe, dans la plupart des cas, d'en enlever les solides en suspension ; on a pour cela recours à des bassins de décantation et des barrages de retenue.

Les barrages de stériles comme les barrages de rétention des boues de stériles ont beaucoup de traits communs avec les barrages de dérivation et les barrages de retenue ; il est donc tout naturel de s'inspirer, pour leur conception, de la technologie des barrages traditionnels. Cependant, les paramètres d'exploitation diffèrent au même titre que les contraintes édictées par les délais, techniques de construction ainsi que les caractéristiques des minéraux intervenant lors de la concentration des minéraux ou des stériles provenant du lavage du charbon. C'est ainsi que les barrages de stériles sont conçus pour être ensuite abandonnés sans autre exploitation. Généralement, leur construction coïncide donc avec leur exploitation ; dans la mesure du possible, ils ne barrent pas de cours d'eau et ne retiennent pas d'eau si ce n'est à des fins d'alluvionnement ou de récupération. Leur raison d'être première est la disposition de déchets solides, non la retenue d'eau, qui n'est qu'un aspect secondaire de leur exploitation. Il s'ensuit qu'il n'est souvent pas recommandable d'utiliser dans ce cas la technologie des barrages traditionnels, et que, de plus, cette façon de procéder risque d'être onéreuse. Ce manuel a donc été rédigé pour familiariser les ingénieurs qui travaillent dans le domaine des barrages et les spécialistes de l'industrie minière avec les applications des techniques du génie civil, du génie géologique et du génie de la climatologie, de l'hydrologie, des ouvrages hydrauliques, de la sismologie, de la mécanique des sols, du terrassement et de la construction dans leur application à la mise en dépôt des stériles. Ce manuel n'entre pas dans les détails de la technologie de ces spécialistes, aussi multiples que complexes ; il se limite à l'application de ces technologies à la mise en remblai des stériles. Ce manuel n'est pas non plus un guide de conception ; il ne s'adresse pas aux spécialistes de grande expérience, il ne se veut qu'un document de référence.

Ce manuel n'est qu'un modeste début, il pourrait ultérieurement être remis à jour et révisé selon les besoins. Il devrait demeurer un outil de référence, augmenté au fur et à mesure de la parution de rapports et de publications qui constitueraient une bibliographie pratique et vivante, en d'autres termes, un registre de l'état des connaissances, qui servirait de référence et de source.

Les stériles sont davantage qu'un matériau susceptible de remplacer la terre pour la construction de barrage dans des cas très particuliers ; c'est l'un des matériaux les plus abondants qui soient à notre disposition pour construire des barrages. Il y en a au moins un peu dans presque tous les pays et certains pays en ont d'énormes quantités. Les stériles miniers sont en fait la matière la plus couramment manipulée dans le monde. Le volume ou le tonnage de minéraux manutentionnés dans le monde chaque année dépasse celui de toutes les autres industries, même celui de la construction autre que minière.

Si l'on pense simplement à la houille et aux métaux non ferreux, on estime à 3805000000 tonnes la production mondiale de houille de 1977 alors que la production mondiale de métaux non ferreux était de l'ordre de 16425000 tonnes en 1974 ; elle est maintenant d'environ 50 % supérieure. L'apparition sur le marché de machines d'extraction en continu depuis 1940, alliée à l'exploitation de filons minces de charbon mélangé à du schiste argileux ou à du grès a contribué à augmenter la quantité des résidus miniers qui sont ramenés à la surface et a nécessité l'implantation d'usines de lavage du charbon à la mine afin de réduire les coûts de transport et de disposition des cendres au point d'utilisation. Le fait que l'on puisse maintenant extraire des minerais moins riches qu'auparavant, puisque l'on extrait maintenant du minerai de cuivre dont la teneur est de l'ordre de 0,3 à 0,4 % alors qu'avant elle était de 3 à 4 % contribue également à faire



be reused or disposed of in most streams without the removal of the suspended solids; therefore, there is a need for settlement ponds and retaining dams.

Tailings dams, or dams for the retention of tailings slurries have many features in common with water diversion or retention dams, therefore, it is natural to start with water dam technology for their design. However their operational needs are different, as are many of the schedule, construction techniques, and minerals characteristics considerations involved with minerals concentration mill and coal cleaning plant tailings disposal. For example, tailings dams are designed to be abandoned and not operated; their construction is usually simultaneous with their operation; where possible they do not cross streams, nor do they usually impound water for purposes other than sedimentation and reclamation. Their ultimate purpose is for solid waste disposal, not water retention, which is only incidental to their operation. Therefore, the automatic application of water dam technology is often not recommendable and may be expensive. This manual therefore has been prepared to acquaint both the dam engineering fraternity and the mining industry with the application of civil engineering and geological engineering technologies of climatology, hydrology, hydraulic structures, seismology, soil mechanics, and earth work engineering and construction applicable to tailings disposal. This is not a manual presenting the technology of these highly diverse and complex specialities, but rather it is a manual covering the application of these technologies to tailings disposal. It is not meant as a design handbook, nor is it addressed to senior specialists but intended as a reference book and guide.

Consequently this manual is only a modest start which may in future be updated and corrected as required. It is intended to remain a guiding tool to be gradually improved by reports and publications inventoried and kept in an active and practical bibliography, in other words a register of the art for reference and communication.

Tailings are not just a different type of earth material used in the construction of some exotic dams. They are one of the most abundant dam building materials in the world. They exist in some quantities in most countries, and in some countries they exist in huge quantities. Mine wastes are, in fact, the most commonly handled materials in the world. The volume or tonnage of materials handled throughout the world each year exceeds that of any other industry in the world including non-mine construction.

Consider just coal mining and non-ferrous metals. In 1977 world coal production was estimated at 3,805,000,000 tons while the 1974 world production of non-ferrous metals was estimated at 16,425,000 tons (of metal). Since that time the annual tonnage has increased by about half as much. The introduction of continuous mining machines by the Coal Mining Industry since the late 1940's, and the mining of thin layers of coal with shale or sandstone innerbedding has increased the amount of coal waste brought to the surface and has introduced the need for coal washing plants at the mine site in order to minimize the haul costs and ash disposal at the point of use. The lowering of the quality of metal ore now being mined for example, in the copper industry, from about 3 or 4% to 0.3 or 0.4% has also increased the amount of waste produced. It is probable that mine waste, and mill and plant tailings production currently (1982) exceed, 5,000,000,000 tons annually therefore, tailings disposal is a big operation.

augmenter la quantité de résidus. On peut penser qu'actuellement (1982), les stériles miniers et les résidus industriels représentent environ 5 milliards de tonnes par an. La disposition de ces déchets est donc une activité considérable.

Les barrages de stériles et les ouvrages constitués par des dépôts de matériaux sont des ouvrages d'envergure qui peuvent entraîner en tant que tels d'importants travaux d'ingénierie. Le Bureau de mise en valeur des terres incultes (Bureau of Reclamation) du Ministère de l'Intérieur des Etats-Unis, faisait figurer dans un relevé de 1975 huit barrages de stériles dans la liste des principaux barrages du monde<sup>1</sup>. Le Registre Mondial des Barrages de Stériles Miniers et Industriels (1982)<sup>2</sup>, qui porte sur 28 pays, recense 8 barrages de stériles de plus de 150 m de hauteur, 22 de plus de 100 m et 115 de plus de 50 m. Il faut ajouter à cette liste six retenues dont la surface est supérieure à 100 km<sup>2</sup> et dont le volume dépasse 50 hm<sup>3</sup>.

Le manuel comprend 4 sections principales :

- Choix et exploration des sites
- Conception
- Construction et exploitation
- Mesures d'abandon

Si la sécurité n'est pas abordée séparément c'est qu'il a été jugé préférable d'aborder le sujet dans le courant du texte de chaque section.

#### *Remerciements*

Je tiens à remercier ici, au nom de la CIGB, les membres du comité pour leur apport, et plus spécialement MM. G.H.H. Legge, G. L'Hériteau, A.D.M. Penman et W.A. Wahler ainsi que leurs collègues, pour leur précieuse collaboration et leur aide dans la rédaction de ce document. Nous espérons que le genre de renseignements qu'il contient contribuera à améliorer les normes actuelles de la spécialité en tirant profit de ce que la technologie moderne met à notre disposition.

Je désire également remercier tout particulièrement ici un collègue dévoué et persévérant de notre organisation, Philippe Mendes, pour l'énorme somme de travail qu'il a fournie pour coordonner la réalisation de ce manuel et pour en assurer la traduction française, ainsi qu'à Pierre Bacave et à G. L'Hériteau qui ont bien voulu revoir la version française.

C.A. Dagenais

*Président du Comité\**  
*Président de la CIGB\*\**

\* Le Comité a été dissous en 1982

\*\* Depuis mai 1982.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] The World's Highest Dams, Largest Earth and Rock Dams, Greatest Man-Made Lakes, Largest Hydroelectric Plants, Major Dams. Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 1975.
- [2] World Register of Tailings Dams and Industrial Waste Embankments (1982), ICOLD, Central Office, Paris.

Tailings dams and disposal structures are individually large and therefore potentially significant engineering works. In a 1975 compilation by the US Department of the Interior, Bureau of Reclamation eight tailings dams were listed among the world's major dams.<sup>1</sup> The World Register of Mine and Industrial Tailings Dams (1982)<sup>2</sup> with data on 28 countries, lists 8 tailings dams higher than 150 m, 22 higher than 100 m, and 115 higher than 50 m. In addition, six impoundments have a surface area greater than 100 km<sup>2</sup>, and a storage volume greater than 50 hm<sup>3</sup>.

The content of this manual comprises four main sections :

- Selection of dam locations and site investigation
- Design
- Construction and operation
- Abandonment

Safety aspects are referred to within the text of the manual. It was considered more desirable to make pertinent references on the subject in the above four chapters.

#### *Acknowledgements*

On behalf of ICOLD, I wish to thank the members of the committee for their contribution and specially the authors, Messrs. G.H.H. Legge, G. L'Hériteau, A.D.M. Penman and W.A. Wahler and their confrères, for their most valued cooperation in the preparation of this document. We hope that the type of information it contains will contribute to raising the present standards in the industry to a higher level offered by present day technology.

I also wish to express a special thank you to a dedicated and persevering colleague in our organisation, Philippe Mendes, for his tremendous help in coordinating the preparation of this manual and for carrying out a tremendous effort in the translation into French. Also a note of acknowledgement to Pierre Bacave and G. L'Hériteau for the review of the French translation.

C.A. Dagenais

*Chairman of the Committee (\*)*  
*President, ICOLD (\*\*)*

\* The Committee came to the end of its term in 1982

\*\* As from May 1982

#### **BIBLIOGRAPHY**

- [1] The World's Highest Dams, Largest Earth and Rock Dams, Greatest Man-Made Lakes, Largest Hydroelectric Plants, Major Dams. Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 1975.
- [2] World Register of Tailings Dams and Industrial Waste Embankments (1982), ICOLD, Central Office, Paris.

## 1. EMPLACEMENT DES BARRAGES

### 1.1 Considérations générales

Les barrages généralement étudiés par la CIGB retiennent de l'eau et sont construits à travers ou le long d'un cours d'eau. Les barrages de stériles miniers ou industriels peuvent être construits n'importe où pour y constituer soit:

- une décharge (dump) si les stériles sont déposés et stockés à l'état sec;
- une retenue (impoundment) si les stériles sont déposés et stockés en combinaison avec de l'eau.

L'emplacement des décharges et des retenues doit répondre (comme pour les barrages hydrauliques) à des conditions imposées généralement par:

- 1) l'économie
- 2) la stabilité de l'ouvrage
- 3) la sécurité publique et le respect de l'environnement
- 4) le bon fonctionnement de l'exploitation envisagée pendant la durée prévue et après sa ré-insertion dans l'environnement.

L'importance du bassin de drainage à l'amont d'une décharge ou d'un barrage de stériles représente un autre facteur à considérer dans le choix d'un emplacement; plus petit sera le bassin et moindres seront les débits à dériver à l'endroit d'une décharge ou d'une retenue, ou à passer par la retenue même et ses ouvrages déversoirs et décanteurs.

L'emplacement de la mine est imposé par la situation du gisement; celui de l'usine est choisi le plus souvent de manière à éviter les frais de transport des matières non utilisables, les stériles par exemple. L'emplacement des décharges ou retenues pour les stériles dépend ainsi du site de la mine ou de l'usine, des conditions d'exploitation et des risques de pollution.

Comme pour les barrages conventionnels, la stabilité de l'ouvrage est fonction:

- des caractéristiques du terrain au site et des conditions locales (topographie, géologie, hydrologie, climatologie, séismes, géotechnique, etc.)

## 1. LOCATION OF DAMS

### 1.1 General

The dams generally studied by ICOLD are of the water retaining type and are built across or along a river. Tailings embankments may be built on any topography for the purpose of creating:

- a dump if the tailings are laid and stockpiled in the dry;
- an impoundment if the tailings are laid and stockpiled with water.

As in the case of water retaining dams the location of the dumps and the impoundments should satisfy the general requirements imposed by:

- a) economy
- b) the stability of the disposal system (tailings dams or dumps)
- c) public safety and the environment
- d) good functioning of the operation during its estimated lifetime and after abandonment.

Size of catchment upstream of a dump or tailings dam is another important consideration in selecting location; the smaller the catchment, the less inflow that has to be by-passed around the dump or impoundment or handled through the impoundment and its outlet facilities.

The siting of the mines is determined by the location of the corresponding geological deposit; that of the process plant is most often selected so as to avoid transportation costs of non-usable material such as mine or industrial waste. The siting of the tailings dams and impoundments depends on the siting of the mine or the plant and also on the operating conditions and pollution risks.

As in the case of water retaining dams, stability is a function of:

- the field characteristics and the local conditions (topography, geology, hydrology, climate, seismicity, overall geotechnical conditions, earthquakes).

La stabilité des barrages de stériles miniers - ou industriels - est également fonction :

- des modifications apportées à ces caractéristiques par l'intervention humaine (travaux miniers par exemple).
- de la nature et des propriétés particulières du matériau stocké et de ses sous-produits.
- de l'évolution de ces propriétés mécaniques et physiques (par consolidation ou altération par exemple), chimiques, etc.
- des conditions de stockage (par voie sèche ou par voie humide, durée et vitesse du stockage, etc.).

La sécurité publique et le respect de l'environnement imposent les mêmes conditions que pour un barrage conventionnel, avec en plus des risques beaucoup plus grands de pollution:

- de l'eau, du fait de la présence de sels solubles intrinsèques au minerai, ou introduits par le traitement, ou produits au cours de l'altération ou du vieillissement des dépôts. On évite de rejeter dans les cours d'eau existants ou dans la nappe phréatique des eaux polluées provenant soit de l'exploitation, soit des eaux de pluie s'infiltrant à travers les dépôts.
- de l'air, par des poussières ou par des dégagements gazeux provenant du minerai, de son traitement, ou des transformations chimiques au cours du vieillissement des dépôts.

Ces risques de pollution doivent être évités non seulement au cours de l'exploitation normale, mais également au cours d'incidents pendant et après l'exploitation (apparition de "renards" par exemple).

De plus, certains dépôts présentent des risques de combustion spontanée (charbons, pyrites, etc.) qui peuvent provoquer des incendies ou plus fréquemment des dégagements de gaz nocifs.

Même si toutes les dispositions nécessaires sont possibles et sont prises, les autorités compétentes peuvent, en particulier à proximité des zones habitées ou des sites touristiques, interdire la construction de décharges ou de retenues, ou bien exiger des aménagements (plantations par exemple) qui viennent augmenter le coût de l'opération.

Une décharge ou une retenue de stériles miniers ou industriels doit avoir les dimensions suffisantes pour assurer l'exploitation de la mine ou de l'usine pendant le délai prévu par l'exploitant.

Le projet est réalisé dans certaines conditions technologiques et économiques qui peuvent être modifiées au cours de la vie de l'ouvrage. Il est utile par conséquent de s'assurer dès le départ que l'emplacement le plus intéressant du point de vue génie civil ne devienne ultérieurement un carcan trop étroit.

Stability of the dumps or impoundments of mining and industrial tailings is also a function of:

- the modifications to these characteristics by man made works (mining works for instance),
- the nature and particular properties of the stockpiled material and its by-products,
- the evolution of those properties, by consolidation or alteration in the case of mechanical and physical ones, or by chemical reaction,
- the stockpiling conditions (in the dry or in the wet), duration and rates of stockpiling,

Public safety and respect of the environment call for the same conditions as a water retaining dam with added provisions against much greater pollution risks:

- from the water, due to the presence of soluble salts in the ore or brought into the ore during processing, or the formation of harmful substances resulting from alteration or aging of the stockpile material. Dumping polluted water coming from the operation, or rain water flowing through the stockpiles, into a river or into the ground water is to be avoided,
- from the air by dust or by gases from the ore, from its processing or from the chemical transformations taking place during the aging of the stockpile.

These pollution risks must be avoided during the normal operation and also during whatever incidents may occur during or following the termination of the operation (development of leaks for instance). Chapter 5 makes a review of precautions following abandonment.

In addition, certain stockpiles have spontaneous combustion risks (for example, coal and pyrites), which may cause fire or more frequently the production of noxious gases.

Even though all the necessary arrangements are feasible and can therefore be implemented, the proper authorities may, in particular in the vicinity of populated zones or near tourist sites, forbid the construction of ponds, dumps or impoundments, or require certain other protective measures, like plantations, which will increase the cost of the operation.

A dump or an impoundment of mining or industrial waste must have sufficient dimensions to allow the mine or plant to operate during its estimated lifetime.

A project is implemented within certain technological or economic conditions which may be modified during the lifetime of the works. It is therefore important to ensure from the outset that consistent with sound civil engineering practice, possible changes in the main parameters affecting operation are not overlooked in site selection.

L'énumération précédente est loin d'être limitative, elle vise simplement à montrer que les techniques généralement utilisées par les ingénieurs "barragistes" doivent être complétées par celles des exploitants de la mine ou de l'usine.

Le ou les emplacements optimaux d'un dépôt ou d'une retenue de stériles miniers et industriels ne peuvent être déterminés que par une étroite collaboration entre tous les intéressés: exploitants, ingénieurs de mines, ingénieurs chimistes, les géologues, géotechniciens, ingénieurs "barragistes", etc.

Le choix entre une décharge ou une retenue ou une combinaison des deux, dépend de la nature et des conditions de l'exploitation envisagée. Il est pratiquement imposé à l'ingénieur de génie civil qui intervient (ou devrait intervenir), pour profiter au mieux techniquement et économiquement des conditions naturelles (topographie, géologie, hydrologie, climatologie, géotechnique, etc.) des différents emplacements possibles, et obtenir par unité de volume des dépôts mis en place, la dépense minimale (frais de transport et déchargement, plus les frais de travaux de confortement nécessaires).

Ces travaux de confortement sont réalisés fréquemment sur les talus extérieurs (choix du matériau, compactage, drainage pour éviter une montée de la pression interstitielle, etc.) et moins souvent sur le fond ou les talus intérieurs naturels ou en remblais (drainage et/ou étanchéité, etc.). On cherche dans la mesure du possible:

- pour les décharges, à diminuer la surface des talus extérieurs en remblais et à augmenter celle des talus naturels.
- pour les retenues, à augmenter le rapport volume stocké/volume de digues; ce rapport, assez faible en terrain plat, peut être important en terrain accidenté.

On est ainsi conduit aux différents types de stockage indiqués par M.M. W.A. Wahler et D.P. Schlick (12e Congrès, CIGB - Q.44 - R.14) et repris dans la figure 1-1, comme dans le registre des barrages de stériles miniers et industriels (fig. 1 du rapport R.14).

## 1.2 Cas de décharges (Dumps)

On peut distinguer 5 cas types d'emplacement de décharges de résidus miniers et industriels.

- ### 1.2.1 Remblai de comblement en val A1.
- On utilise un val naturel (ou parfois artificiel s'il s'agit par exemple d'une ancienne exploitation à ciel ouvert) que l'on comble de stériles. Le tas a un talus de remblai extérieur d'un seul côté; il peut être réalisé du bas vers le haut ou en déversant du haut et en progressant suivant la ligne de plus grande pente du val. Les conditions hydrauliques



The preceding listing is not restrictive. Its purpose is to show that techniques generally used by conventional dam design engineers must be supplemented by those of mine and plant operating personnel.

The best site or sites for a stockpile or an impoundment of mining and industrial wastes may be selected only in close collaboration among the concerned parties: operating engineers, mine engineers, chemical engineers, geologists, geotechnical engineers, water retaining dam designers, and other specialists.

The choice of a dump or an impoundment or a combination of the two depends on the nature and conditions of the contemplated operation. This choice is practically imposed on the civil engineer who intervenes (or should intervene) to take advantage technically and economically of such natural conditions as topography, geology, hydrology, climate, soils, at the different possible sites. The Engineer should also obtain transportation and unloading costs per unit volume of the material stockpiled plus the costs of required remedial work (improvements and reinforcements).

Even with good initial design, this remedial work may become necessary due to changes that occur in rate of output or the type of waste product during the long construction period of the dump. It is frequently needed on outside slopes covering a choice of materials, compaction, drainage to avoid pore pressures, etc. Less often, remedial work may be carried out on the bottom, on the interior slopes or on the dumps by adding drainage and/or watertightness facilities. Insofar as possible, it is aimed to:

- in the case of dumps, to reduce the surface area of the outside slopes and to increase that of the natural slopes,
- for impoundments, to increase the ratio of the stockpiled material to the volume of the retaining structures; this ratio which is fairly low in flat terrain, may become much greater in rugged terrain.

Various types of stockpiling are thus possible as shown on Fig. 1-1 (1).\*

## 1.2 Dumps

This section describes five methods to dispose of mine and industrial waste.

- 1.2.1 The valley fill type A1. This method is used in a natural valley (or an artificial one in the case of an old open pit type operation) filled in by mining or industrial waste. The embankment has an outside slope on one side only; it may be made from bottom to top or by dumping from the top progressing along the steeper slopes of the valley. The hydraulic conditions may require

\* From paper R14, Q44, 12th ICOLD Congress

peuvent imposer un drainage dans le fond du thalweg, la nature des produits stockés et la perméabilité des berges et du fond peuvent imposer leur étanchement. Ce type de décharge est souvent le plus économique; il est à retenir aussi souvent que possible.

- 1.2.2 Remblai en travers de val A2. Le tas de stériles a un talus de remblai extérieur des deux côtés, vers l'amont et vers l'aval du val. Il faut généralement éviter de constituer une retenue des eaux de ruissellement dans le val à l'amont du tas et prévoir un drainage sous le tas.
- 1.2.3 Remblai à flanc de coteau A3. Le tas de stériles a un talus de remblai extérieur de 3 côtés. S'il ne descend pas jusqu'au fond du val il faut particulièrement vérifier:

- la stabilité du talus naturel du val, car le tas n'est plus un élément stabilisant des talus naturels comme pour A1 et A2.
- la possibilité de venues d'eau derrière le tas dans le talus naturel, risquant de provoquer une montée de la pression interstitielle, et constituer une amorce de pollution de la nappe phréatique.

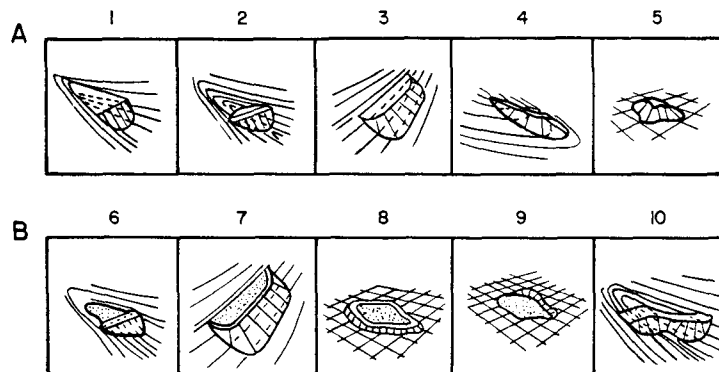


Fig. 1-1

Types de remblais de résidus miniers.

(A) Type de décharge des matériaux de rebuts miniers.  
(B) Type de retenue.

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| (1) Remblai de comblement en val. | (6) Remblai en travers de val                                   |
| (2) Remblai en travers de val.    | (7) A flanc de coteau.  |
| (3) A flanc de coteau.            | (8) Entouré d'une digue simple.                                 |
| (4) Sur sommet.                   | (9) Incisé.   |
| (5) Empilement                    | (10) Système complexe : en travers de val<br>A flanc de coteau. |

Types of refuse disposal structures.

(A) Type of dump.  
(B) Type of impoundment.

- |                   |   |
|-------------------|---|
| (1) Valley-fill   | (6) Cross-valley                        |
| (2) Cross-valley. | (7) Side-hill.                          |
| (3) Side-hill.    | (8) Diked.                              |
| (4) Ridge.        | (9) Incised.                            |
| (5) Pile.         | (10) Complex : cross-valley, side-hill. |

drainage of the valley bottom and diversion of stormwater from the catchment surrounding the fill. The type of stockpiled material, and the permeability of the top slopes and of the bottom, may call for watertightness measures. This type of dumping is often the most economical and is adopted whenever possible.

- 1.2.2 Cross valley fill type A2. This mine or industrial waste embankment has an outside slope on the two sides upstream and downstream of the valley. In general an impoundment with run-off water in the valley upstream of the embankment should be avoided and allowance for drainage under the stockpile should be made.
- 1.2.3 Hillside type A3. The tailing stockpile has an outside slope on three sides. If it does not extend down to the bottom of the valley the following must be verified:
- the reduction of stability of the natural slopes of the valley caused by the fill, since the stockpile is not a stabilizing factor over the natural slope as was the case for types A1 and A2,
  - the possibility of leakage from behind the embankment into the natural slopes with the risk of causing a rise in pore pressures and pollution of the ground water.

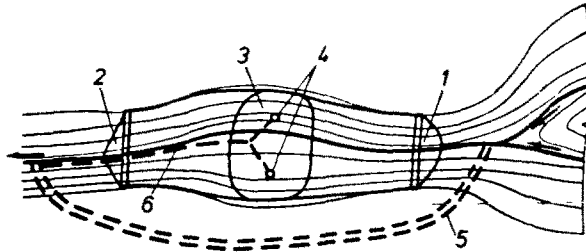


FIG. 1-2

Retenue à deux digues en travers de la vallée  
*Cross-valley impoundment with two impounding dikes.*

- B11
1. Digue amont = *Upstream Dike*
  2. Digue aval = *Downstream Dike*
  3. Bassin de décantation = *Decant Pond*
  4. Tour de décantation = *Decant Towers*
  5. Galerie de dérivation = *Diversion Tunnel*
  6. Collecteur = *Collector*

- 1.2.4 Remblai sur sommet A4. Le tas de stériles est comparable à celui du cas A3, avec une hauteur de dépôt variable. Les remarques faites pour A3 restent applicables.
- 1.2.5 Empilement A5. Le tas de stériles a un talus de remblai extérieur sur tout son pourtour. Il est souvent le moins économique, mais le seul cas possible en terrain plat, il est utilisé pour les terrils de nombreuses régions minières européennes comme partout où la topographie l'impose.
- 1.3 Cas des retenues (Impoundments)
- 1.3.1 Remblai en travers de val B6. La digue de retenue à la même position que le tas de stériles A2. Mais contrairement à A2, cette digue ne se trouve que d'un côté de la retenue, elle doit supporter la poussée des stériles au moins partiellement liquides déposés en amont du val. La stabilité et les risques d'érosion des berges du val servant d'appui à la digue, doivent être vérifiés. Pour éviter la pollution par les eaux de la retenue, l'étanchéité de toute la partie amont du val doit être vérifiée.
- 1.3.2 Remblai à flanc de coteau B7. La digue de retenue à la même position que le tas de stériles A3; elle se trouve de 3 côtés de la retenue et supporte la poussée des stériles. La stabilité, les risques d'érosion et l'étanchéité de la berge du val doivent être vérifiés.
- 1.3.3 Retenue entourée d'une digue simple B8. La digue entoure la retenue sur tout son pourtour. Ce cas est celui des terrains plats. La stabilité des fondations de la digue et l'étanchéité du fond de la retenue doivent être vérifiées.
- 1.3.4 Retenue incisée B9. La retenue étant partiellement enterrée, la digue n'intéresse qu'une partie de son pourtour. Ce cas valable pour les terrains à assez faible pente est une combinaison de B7 et B8 et constitue la limite d'un cas B8 où la hauteur de digue et la profondeur de terrassement seraient variables. Les remarques faites en B7 et B8 s'appliquent.
- 1.3.5 Système complexe, en travers de val et à flanc de coteau B10. Ce cas est une combinaison de B6 et B7. Les remarques faites pour B6 et B7 s'appliquent.
- 1.3.6 Remblai en travers de val avec deux remblais de retenue, B11 (cf figure 1.2). Le premier des remblais est construit à l'aval et le deuxième à l'amont. Les stériles sont déposés entre les deux remblais; ceux-ci peuvent être construits en utilisant des matériaux d'emprunt, terre ou roc, ou encore en utilisant les stériles mêmes, si assez gros. L'écoulement naturel du val est dérivé par des galeries dimensionnées pour passer la crue de projet.

Vu que la distance entre les deux remblais peut être arbitraire, ce type de retenue offre un grand volume d'emmagasinement. Il possède l'avantage d'un volume de remblais faible par rapport au volume de la retenue, c'est-à-dire que moins de gros matériaux sont nécessaires pour construire un ouvrage stable.

- 1.2.4 Ridge type A4. The stockpile is comparable to A3, with a varying deposit height. The comments and observations made for A3 also apply.
- 1.2.5 Pile type A5. The stockpile has an outside slope in all around its periphery. It is often the less economical type of dump, although it is the only possible one for flat ground. It is used wherever topography so dictates.
- 1.3 Impoundments
- 1.3.1 Cross valley impoundment type B6. The retaining dam has the same positioning as tailings stockpile A2. But unlike to A2, this dam is on a single side of the impoundment. It must carry the load of partly liquid tailings deposited upstream. The stability and the risks of erosion of the valley slopes serving as abutments to the dike should be verified. To avoid pollution by the impounded waters, the watertightness of all the upstream part of the valley should be verified. As in the case A1, stormwater diversion facilities must be provided.
- 1.3.2 Hillside type B7. The impounding embankment has the same positioning as A3. It is on three sides of the impoundment and carries the load of the impounded tailings. The stability, the erosion risks and the watertightness of the valley abutment should be verified.
- 1.3.3 Impoundment surrounded by a single dike, type B8. The dam surrounds the impoundment on all sides. This case applies on flat ground. The stability of the foundations of the embankment and the watertightness of the bottom of the impoundment should be verified.
- 1.3.4 Inside impoundment type B9. The impoundment is partly buried. The dam affects only part of its periphery. This type applies on generally flat ground. It is a combination of types B7 and B8 and the limiting case of type B8 where the dam height and the depth of backfill would vary. The comments made on B7 and B8 apply.
- 1.3.5 Complex system, cross valley and side hill type B10. This is a combination of types B6 and B7; the comments made for B6 and B7 apply.
- 1.3.6 Cross-valley impoundment with two impounding embankments B11, as shown by fig. 1-2. The first embankment is on the downstream side and the second one is on the upstream side. The tailings are impounded between the two embankments, which can be built from borrow material, earth or rock, or from the tailings themselves if they are coarse enough. The river is diverted by tunnels sized to conduct the project design flood. As the distance between the two dams may be arbitrarily long, this type offers big impoundment volume. It has the advantage that the volume of the dams is small with respect to the volume of the impoundment, i.e. less coarse material is necessary to build a stable construction (2).

#### BIBLIOGRAPHIE

1. "Mine Refuse Impoundments in the United States", Wahler, W.A. and Schlick, D.P., Proceedings 12th International Congress on Large Dams, Question 44, Report R14, Mexico 1976.
2. "Experience from the Construction of Dams for Tailing Dumps in the People's Republic of Bulgaria", Ilievs, S. Nikolov and G. Avramov, Proceedings 12th International Congress on Large Dams, Question 44, Report 17, Mexico 1976.
3. Carmet, Canada - Center for Mineral and Energy Technology, "Pit Slope Manual - Chap. 9 - Waste Embankments".

#### BIBLIOGRAPHY

1. "Mine Refuse Impoundments in the United States", Wahler, W.A. and Schlick, D.P., Proceedings 12th International Congress on Large Dams, Question 44, Report R14, Mexico City, Mexico, 1976.
2. "Experience from the Construction of Dams for Tailing Dumps in the People's Republic of Bulgaria", Ilievs, S. Nikolov and G. Avramov, Proceedings 12th International Congress on Large Dams, Question 44, Report 17, Mexico City, Mexico, 1976.
3. Carmet, Canada - Center for mineral and Energy Technology, " Pit Slope Manual - Chap. 9 - Waste Embankments ".

## 2. EXPLORATION DU SITE

### 2.1 Généralités et convenance des sites

L'exploration du site doit fournir aux projeteurs la connaissance de tous les éléments nécessaires au choix de l'emplacement optimum (voir chapitre 1) répondant aux conditions imposées par l'économie, la stabilité de l'ouvrage, la sécurité publique et le bon fonctionnement de l'exploitation. Son importance est fonction:

- des dimensions de la décharge et des digues de la retenue.
- de la complexité du site.
- des conséquences d'une rupture éventuelle.

Dès que la hauteur des décharges ou des digues de retenue atteint ou dépasse une douzaine de mètres, l'exploration doit comporter, en plus des essais et mesures des caractéristiques des terrains de fondation, zones d'emprunt et stériles mêmes, des données analogues à celles recherchées pour un barrage hydraulique conventionnel, portant sur:

- la topographie avec l'emplacement des cours d'eau, des habitations et installations, et aussi des anciens travaux miniers;
- la géologie (nature et disposition des différentes couches, affleurements rocheux, accidents, karst, séismes, etc.);
- l'hydrologie (débits des cours d'eau, crues, position et fluctuation de la nappe phréatique, etc.);
- la climatologie (pluies, leur répartition et pointes; températures, évaporation, gel, sa durée et pénétration, chutes de neige, etc.);
- l'utilisation des eaux de surface ou souterraines.

Une bonne connaissance de la géologie du site permet de bien établir les rapports de forage et de déterminer l'étendue des argiles, limons (silts) et graviers sous-jacents au terrain. Pour leur part, les rapports de forages aident à confirmer la géologie du site. Les divers types de roche, les failles, les minéraux, etc., nécessaires à la délimitation des gisements permettent également de choisir un site de dépôt approprié.

Il ne faut jamais admettre qu'il n'y a pas de minerai rentable sous un site de dépôt. Il faut plutôt en vérifier l'existence par des forages, après quoi le sol de surface (mort-terrain), si de faible profondeur, doit faire l'objet de forages et échantillonnage,



## 2. SITE INVESTIGATION

### 2.1 Site Selection

The site investigation should provide designers with the knowledge of all necessary elements to permit the choice of the best type of impoundment (see Chapter 1) meeting the criteria imposed by economy, embankment stability, public safety and a sound operation. The extent of the site investigation is governed by:

- dimensions of the dump and of the impounding embankments,
- site complexity,
- consequences of possible failure,
- risks of pollution, atmospheric or water resources.

If the design height of a dump or impoundment dam is to exceed 10 m, the investigation should comprise, in addition to testing and the assessment of characteristics of the foundations, borrow areas and the mine and industrial wastes, the same type of information obtained for a water retaining dam and covering:

- topography with the location of rivers, streams, dwellings, installations and underground workings,
- geology (nature, properties and arrangement of the different layers or formations, rock outcrops, geological features, karst, seismicity),
- hydrology (stream flows, floods, location and fluctuations of the phreatic surface),
- climate (rainfall distribution and extremes; temperature pattern, evaporation, frost, frost duration and penetration, snowfall),
- water usage, surface or underground.

Knowledge of regional geology is necessary to properly log the drill holes and to know the extent of clays, silts, and gravels that might underlie the areas. In turn, the drill-hole logs help in confirming the site geology. Rock types, faults and mineralization, that are necessary in ore delineation are also helpful in choosing a tailing site.

It should never be assumed that no economic mineralization exists beneath a tailings site. This should be verified by drilling. Then, if it is relatively shallow, the overburden should be drilled and sampled down to bedrock or to a firm base for the dam foundation.

jusqu'au rocher ou jusqu'à une fondation acceptable pour un barrage. On prendra des échantillons de sol au moyen de tubes Shelby et de "split spoon"; le sol est alors soumis aux essais permettant de déterminer leurs propriétés géotechniques telles que la granulométrie, la résistance au cisaillement, la cohésion, la densité, la teneur en eau, la classification, etc. Les résidus de décapage, si acceptables aux fins de construction de barrages, doivent être soumis à des essais pour en déterminer les propriétés géotechniques. On excavera des puits d'essai dans l'emprise de la retenue et l'on y prélèvera des échantillons pour évaluer si les matériaux de l'endroit se prêtent à la construction de barrages. Il importe donc de connaître la nature et le volume des divers matériaux disponibles.

Toute retenue de stériles doit être conçue pour résister au tremblement de terre maximum probable au site. La magnitude, la distance au site, ainsi que la profondeur du plus fort tremblement enregistré doivent être consignés; de ces données on déduira l'accélération maximale du socle, sa vitesse maximale et sa déformation.

Le concepteur doit connaître la météorologie de l'endroit, en mettant à contribution les services spécialisés nationaux. Le cas échéant on installera une station de météo au site conçue pour relever la précipitation annuelle mensuelle, l'évaporation, les débits, la vitesse du vent et sa direction, et la température. Les basses températures d'hiver peuvent affecter le mode de mise en dépôt des stériles.

Tous les forages doivent être bien décrits, en ayant soin de consigner dans les rapports les nappes phréatiques régionales et perchées. On procédera de plus à des essais d'eau à différents niveaux à l'intérieur et sous le remblai. Les trous de forage situés sous le remblai doivent être maintenus pour permettre l'exécution d'essais périodiques de la qualité de l'eau avant l'entrée de la mine en régime d'exploitation et par la suite durant sa vie entière.

Les renseignements à obtenir dans l'exploration, s'ils sont comparables à ceux recherchés pour un barrage conventionnel, présentent cependant des aspects spécifiques à l'exploitation minière ou industrielle étudiée; ils peuvent avoir une influence sur cette exploitation.

La topographie intervient directement pour fixer:

- le type de décharge qu'il est possible de réaliser de manière la plus économique (en comblement de val, ou autres, etc.);
- les conditions de terrassement (à partir du haut ou à partir du bas, par exemple);
- les hauteurs de digue à prévoir en fonction des aires disponibles, du volume de stériles à stocker et des cadences de montée permises.

Undisturbed samples should be taken, and the soil tested for such geotechnical properties as gradation, shear strength, cohesion, density, moisture and soil classification. Stripping wastes, if to be used for dam construction, should be tested for geotechnical properties. Test pits should be excavated within the pond area and also sampled for potential dam building materials. It is important to know the kind and volume of various materials available.

The tailing impoundment should be designed to withstand the maximum earthquake that could be expected at the site. The magnitude, distance from the site, and depth of the strongest earthquake recorded should be noted, and from this, peak acceleration on bedrock, peak velocity and displacement can be predicted.

The design engineer should know the weather in the area, using the nearest government meteorological services office unless it is some distance from the mine site. Then a weather station should be established at the site to get annual precipitation by months, evaporation, streamflow, wind velocity and direction, and temperature. Cold winter temperatures can affect the mode of tailing deposition.

All drill holes should be carefully logged, regional and perched water tables noted, and water sampled at different places within and below the embankment. Those holes below the embankment should be kept for periodic water quality tests before the mine becomes operational and during the entire life of the mine.

The information to be obtained in an investigation program, although comparable to that obtained for a water retaining dam, presents some differences due to the mining or industrial operations under study, as it may have an influence on the operation itself.

The topography becomes important in determining:

- the most economical type of dump that may be adopted,
- the method of dumping (see Chapter 4),
- the embankment heights to be allowed for in view of the disposal space and the volume of tailings to be stockpiled, and the permissible rates of rise.

De même, la position des cours d'eau et les problèmes hydrologiques prennent une importance particulière en raison des risques de pollution des eaux par les produits de l'exploitation étudiée.

La perméabilité des terrains présente une importance accrue pour les mêmes raisons de pollution.

Par ailleurs, les séismes peuvent provoquer la liquéfaction du matériau stocké et modifier ainsi les conditions d'équilibre de la digue, même si celle-ci et ses fondations ne sont pas liquéfiées.

Du point de vue climatologique, la précipitation ne doit pas modifier de manière sensible la hauteur d'eau des bassins de décantation, cette hauteur étant fixée pour obtenir le degré de clarification désiré dans l'exploitation. De même, le gel ne doit pas entraîner un arrêt inattendu de l'exploitation en obstruant le système d'évacuation des eaux de fuites, ou en provoquant une montée inacceptable de la pression interstitielle.

Les sources et les méthodes utilisées pour obtenir les renseignements nécessaires sont analogues à celles employées pour l'étude d'un barrage conventionnel, la différence résidant essentiellement dans l'étude des propriétés et caractéristiques des stériles miniers et industriels et de leurs conséquences.

Pour la topographie on utilise les cartes et photographies aériennes publiées par les services compétents, ou à défaut on fait procéder aux levées photographiques nécessaires. Les études préliminaires sont généralement faites sur des cartes au 1/5000 en lignes de niveaux tous les 2,50 m. Les études détaillées sont faites à une échelle plus faible et des lignes de niveaux plus rapprochées. Les cartes doivent comporter: les lignes de niveau, les affleurements rocheux, les surfaces boisées, les drainages superficiels ou souterrains, les accès routiers, l'emplacement des points de reconnaissance (sondage, puits, etc.), et tout autre élément pouvant être affecté par le dépôt, ou intervenir dans la sécurité de celui-ci.

Pour la géologie on utilise les cartes et documents existants et on procède aux reconnaissances complémentaires par puits, tranchées, galeries, sondages avec prélèvement d'échantillons et essais d'eau, géophysique, etc. On recherche toutes les anomalies naturelles (artésianisme, karst, argiles gonflantes, etc.) ou artificielles (travaux miniers). Le matériel utilisé, la technique et les échantillons prélevés (remaniés, intacts) sont ceux du génie civil.

Pour l'hydrologie et la climatologie on a recours aux services compétents et aux méthodes habituelles des barrages conventionnels.

## 2.2 Propriétés et caractéristiques des stériles miniers et industriels

### 2.2.1 Propriétés

Alors que dans les études de génie civil on a affaire à des sols et des eaux en général chimiquement neutres, il n'en est souvent pas de même pour les stériles miniers et industriels. Leur composition

The location of the streams and rivers and the hydrological conditions assume particular importance due to the water pollution risks caused by the products of the operation under study.

The ground permeability has a major importance for the same reasons.

Earthquakes may cause liquefaction of the stockpiled material and thus modify the equilibrium of the embankment, even though the embankment and its foundations may not themselves be liquefied.

The design should be such that catchment runoff does not modify in any significant way the freeboard or the water depth in the sedimentation basins, these heights being set for safety and in order to obtain the high degree of clarity desired in the operation. Likewise, frost should not bring about an unexpected stoppage of the operation, preventing the disposal of run-off or causing an unacceptable increase in pore pressures.

The sources and methods used to obtain the necessary information are the same as those used for the study of water retaining dams. The difference lies essentially in the study of the properties and characteristics of the mining and industrial wastes and of their effects.

As to the topography, use is made of published maps and aerial photos. If not available, new photo surveys can be carried out if necessary. Preliminary studies are generally made on 1:5000 scale maps with contour lines every 2,50 m. Detailed studies are made at a larger scale with closer contours. Maps should contain: contour lines, rock outcrops, wooded areas, surface or underground drainage, road access, all those elements which may affect or be affected by the stockpile or affect the safety of the stockpile, survey points, holes, boreholes and shafts).

For the geology, use is made of maps and existing documents supplemented by the same complementary investigations by test pits, trenches, galleries, boreholes with sample collection, and water and geophysical testing. All natural anomalies, like artesian phenomena, karst or swelling clays, or artificial ones like mining works, are searched for and identified. The equipment used, the technique and the collected samples (remoulded or undisturbed) are those of civil engineering.

For hydrology and climatology the local recognized services and the methods in use in the study of water retaining dams are used.

## 2.2 Properties and Characteristics of Mining and Industrial Wastes

### 2.2.1 Properties

Although soils and waters found in engineering water retaining dams are usually chemically neutral, such is often not the case for mining and industrial wastes. Their composition varies according

---

et leur évolution dans le temps sont très variables suivant la nature et les conditions de l'exploitation étudiée. Elles peuvent renfermer des sels solubles et toxiques.

Dans les mines de charbon, les stériles comportent un pourcentage important de schistes et de grès silteux ou sableux qui peuvent s'altérer à la longue. Les stériles comportant des éléments grossiers sont utilisés pour construire les digues retenant des éléments fins apportés par voie humide. Dans certains cas on filtre le "slurry" et le "cake" retiré est mélangé aux éléments grossiers. Le matériau filtré est humide à son départ de l'usine, il peut durcir pendant son transport.

Un dépôt récent de stériles de charbon est normalement neutre ou légèrement alcalin, mais l'altération peut augmenter son acidité. Une forte acidité et une forte teneur en sels de manganèse, de fer, ou particulièrement d'aluminium peuvent rendre les eaux toxiques et nuire à la végétation.

Dans les mines d'amiante, les stériles fins et grossiers peuvent être déposés séparément; ils sont généralement transportés à sec vers un dépôt commun. Ces stériles renferment des éléments argileux qui, exposés à l'atmosphère et à l'eau (atmosphérique ou eau d'arrosage antipoussière), peuvent affecter la stabilité du dépôt.

Dans les mines de cuivre, de plomb, de zinc, de fer, les stériles ont une forte teneur en sulfures, particulièrement en sulfure de fer. Ces sulfures sont plus lourds que les éléments siliceux et se déposent plus vite. En s'oxydant, ils peuvent former des croûtes dures empêchant ou gênant le drainage.

Une forte teneur en sulfures peut entraîner une inflammation et une combustion spontanées, ajoutant ces dangers à ceux entraînés par la pollution de l'eau. On peut étouffer ces combustions avec des "slurry" de stériles, mais ceux-ci peuvent nuire à la stabilité des dépôts.

Dans les mines d'or, le minerai est traité au cyanure de sodium qui est un poison violent. Heureusement le cyanure s'oxyde très rapidement si exposé à l'air pour former des composés inoffensifs. Lorsque l'or est associé aux sulfures (pyrites), dont une partie reste dans les stériles, des conditions acides se développent à la suite de l'oxydation.

Dans les mines d'uranium le lavage du minerai se faisant à l'acide, les eaux ont un pH très faible et une haute teneur en métal. Les effluents doivent nécessairement être collectés, contrôlés et traités si nécessaire, et les infiltrations réduites au minimum.

Dans les mines ou carrières de porphyres, les stériles, riches en quartz et silicate, n'ont pas de cohésion mais un grand angle de frottement. Ils peuvent être utilisés pour construire les digues, en tenant compte de leur grande érodabilité au vent et à l'eau, ce qui conduit à végétaliser les talus.

to the nature and conditions of the operation and they are prone to change over a period of time. The wastes may contain soluble and toxic salts.

In coal mines, wastes carry a high percentage of schists and siltstone or sandstone; the schists and the siltstone may be altered in the long term. The wastes contain coarse and fine components which may be stockpiled separately or together. The coarse elements are used to construct retaining dams for the impoundment of finer elements by wet methods. In some cases the slurry is filtered and the cake is mixed with the coarser elements. The filtered material is wet when it leaves the plant and it may harden during its transport.

A fresh dump of coal wastes is normally neutral or slightly alkaline, but weathering may increase its acidity. A high degree of acidity and a high content in salts of manganese, iron or aluminum in particular, can make the effluent toxic and affect vegetation.

In asbestos mines, the coarse and the fine wastes may be dumped separately; they are generally transported in a dry state toward a common dump. These wastes contain clay elements which when exposed to atmosphere and to water (atmospheric or antidust sprinkling water) may affect the stability of the dump.

In copper, lead, zinc and iron mines, the wastes may have a high sulphur content, particularly iron. These are heavier than the silicious elements and settle at a faster rate. As they become oxidized, they may form hard crusts preventing or limiting the drainage.

A high content of sulphur may bring about ignition and spontaneous combustion, thus adding dangers to those due to water pollution. The combustion may be extinguished by covering or mixing with waste slurries but these may hamper the stockpile stability.

In gold mines, the ore is treated with sodium cyanide which is highly toxic. Fortunately, the cyanide oxides very rapidly on exposure to air to form harmless compounds. When the gold is associated with sulphides (pyrites), some of which remain in the tailings, acidic conditions will develop as a result of oxidation.

In uranium mines, acid is used to leach the ore; the effluent has a very low pH and a high metal content. Effluents should be collected, controlled and treated if necessary, and the infiltrations reduced to a minimum. Radiation and radon gas are emitted from uranium wastes and their effluents. These emanations should similarly be controlled if necessary.

In porphyry mines or quarries, wastes are rich in quartz and silicate. They have no cohesion but they have a very high angle of shearing resistance. They may be used to build dams, but taking into account their high erodibility by wind and water, this implies revegetation of the slopes or blanketing them with a layer of coarse non-erodible material.

Dans les usines de potasse, les stériles vont généralement de grains de 5 mm jusqu'au sel en solution, ils ont une faible teneur en potasse (KCl) et des teneurs variables en argiles insolubles (carbonates et silicates). Ils sont refoulés vers les bassins de décantation par pompage dans une saumure saturée. Les parties grossières décantent et se drainent rapidement formant des dépôts rigides. Les parties fines se tassent lentement en entraînant de l'air et en produisant souvent de l'écume à la surface du bassin. Il faut prévoir une surface suffisante de bassin de décantation et des écrans tranquillisateurs à l'entrée du bassin pour arrêter l'écume. Des difficultés ont été rencontrées quand il existait un seul bassin de décantation (fuites de saumure, dilution de la saumure par l'eau de pluie). Il est préférable soit de prévoir des bassins naturels pour retenir les stériles de potasse, soit de construire des digues de retenues avec des matériaux d'emprunt, soit de prévoir des bassins séparés pour la décantation finale de la fraction argileuse des stériles. Les infiltrations de saumure dans le sous-sol doivent être limitées au maximum, il faut s'assurer que les sols de fond de dépôt sont très peu perméables ou prévoir une membrane étanche sur les sols perméables.

L'énumération précédente n'est pas limitative, l'exploration nécessaire fait appel à des techniques différentes de celles du génie civil, notamment dans le domaine de la chimie et de la minéralogie.

#### 2.2.2 Caractéristiques mécaniques

##### . Stériles

Comme pour les sols, les caractéristiques mécaniques portent sur l'identification, la résistance et la déformation habituellement mesurées en mécanique des sols et sur les rapports entre elles. Les stériles comme les sols sont un milieu triphasé (grains solides, liquide et gaz dans les pores). Mais plus fréquemment qu'en mécanique des sols on trouve dans les stériles des cas particuliers:

- grains de nature différente de forme très aplatie, pouvant entraîner un comportement thixotropique (comme pour la bentonite).
- liquide interstitiel qui n'est pas de l'eau neutre.
- gaz interstitiel qui n'est pas de l'air, ce qui entraîne des conditions particulières d'évolution dans le temps (sels solubles arrivant à cimenter les dépôts par exemple).

Comme pour les sols et suivant les techniques bien connues des ingénieurs de génie civil, on détermine:

##### 1) L'identification

- la courbe granulométrique ainsi que le coefficient d'uniformité  $\gamma = \frac{D_{60}}{D_{10}}$



In potassium plants, the wastes vary in size generally from 5 mm grains to the salt in the solution and have an allowable potassium chloride content (KCl) with variable contents of insoluble clays (carbonates and silicates). They are pumped back to basins in a saturated brine. The coarse components settle down and drain rapidly forming stable deposits. The fine particles settle slowly bringing air with them and often producing foam at the basin surface. Allowance should be made for a sufficient settlement basin surface and for tranquilizing screens at the entrance to the basin to stop the foam. Difficulties have been experienced when an operation had only one settlement basin (brine leakage, dissolution of brine by rainfall water). It is preferred to allow for natural basins to hold the potassium wastes, or to build retaining dams with the borrow materials, or to allow separated basins for the final settlement of the clay portion of the waste. Brine infiltration into the ground should be limited, and one should make sure that the soils at the bottom of a dump have very low permeability or otherwise provide a watertight membrane.

The preceding listing is not restrictive. Investigation methods require the use of techniques different from those in civil engineering, especially in the fields of chemistry and mineralogy.

#### 2.2.2 Mechanical Characteristics

##### o Tailings

As in soils, tailings have identification, strength and deformation characteristics usually measured by soil mechanics tests. The wastes and the soils are a triphase medium (solid grains, liquid and gas in the pores). However, more frequently than in soil mechanics, particular conditions are found in the wastes, such as:

- grains of an unusual nature, e.g. flaky particles or material having a thixotropic behavior like bentonite,
- pore fluid other than water of neutral pH,
- interstitial gas other than air, bringing about particularly changeable conditions (soluble salts which in the long run cement the deposited materials).

The characteristics of tailings are determined according to techniques well known to civil engineering. The following properties are particularly relevant:

##### i) For identification:

- the particle size distribution curve and the uniformity coefficient  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Les stériles présentent une large variation de granulométrie, généralement comprise entre le sable grossier et les éléments colloïdaux;

- les limites d'Atterberg: limite de liquidité LL, limite de plasticité PL et indice de plasticité, PI = LL - PL. La nomenclature doit être conforme au lexique normalisé de la mécanique des sols, tel que publié dans Géotechnique, Vol. 2, N° 1, pp. 84-86, ou toute autre nomenclature adoptée plus récemment. Pour les stériles de charbon on a LL généralement compris entre 20 et 60 % et PI entre 0 et 30 %.
- la teneur en eau w%
- les poids volumiques des grains  $\gamma_s$   
 du matériau humide  $\gamma_s$   
 du matériau sec  $\gamma_d$   
 du matériau saturé  $\gamma_{sat}$   
 du liquide interstitiel  $\gamma_w$

Pour les stériles  $\gamma_s$  est généralement compris entre 25 et 35 kN/m<sup>3</sup> suivant leur composition minéralogique. On peut déduire de  $\gamma_s$  et  $\gamma_d$  l'indice des vides et/ou la porosité N, et comparer les caractéristiques du stérile étudié à la compacité maximale du Proctor Standard.

- le taux de variation de  $\gamma$  en fonction de la profondeur.

- la densité relative donnée par:

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \cdot 100\% = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}$$

- le coefficient de perméabilité K (m/s). Les conditions de dépôt des stériles conduisent souvent à une perméabilité horizontale 10 à 100 fois plus grande que la perméabilité verticale.
- le temps de drainage ou d'assèchement du sable stérile;
- le rapport pondéré poids/volume pour usage dans la conception, pendant l'exploitation du site et sa ré-insertion ultérieure.

#### ii) La résistance

En général on mesure les caractéristiques de cisaillement à l'appareil de cisaillement direct ou à l'appareil triaxial pour connaître les valeurs apparentes  $\beta_u$  et  $C_u$  et intergranulaires  $\phi'$  et  $C'_u$ , de l'angle de résistance au cisaillement  $\phi$  et de la cohésion C.

Pour les stériles on a généralement  $C_u = 0$  et  $\phi'$  compris entre 22 et 32° pour les exploitations de charbon et entre 30 et 36° pour les autres exploitations.

Tailings may exhibit a large variation in granulometry, with grain sizes varying from coarse sand to colloidal particles;

- the Atterberg limits : the liquid limit LL, the plastic limit PL and the plastic index  $PI = LL - PL$ . Nomenclature should comply with the lexicon published in the magazine Geotechnique Vol. 2 No 1, pp. 84-86, or any other more recently published nomenclature. For coal tailings, the LL is generally situated between 20 and 60 % and the PI between 0 and 30 %.

- Water content  $w$  % .

- the weight density of the grains  $\gamma_s$ 
  - the wet material  $\gamma$
  - the dry material  $\gamma_d$
  - the saturated material  $\gamma_{sat}$
  - the interstitial liquid  $\gamma_w$

For the wastes  $\gamma_s$  generally lies between 25 and 35 kN/m<sup>3</sup> according to the mineralogical composition. The void ratio  $e$  or the porosity  $\eta$  may be established from the coefficients  $\gamma_s$  and  $\gamma_d$ , and the waste characteristics may be compared to the maximum Standard Proctor maximum density.

- the rate of variation of  $\gamma$  with depth ;

- the relative density given by:

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \cdot 100\% = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}$$

- the permeability coefficient  $k$  (m/sec). The conditions in which the wastes are deposited often lead to a horizontal permeability that is 10 to 100 times greater than the vertical permeability.
- the draining out or drying time of tailings sand;
- the weight averaged ratio weight/volume for use in design during tailing site filling and abandonment.

ii) For strength:

The shear strength parameters  $\phi'$  and  $C'$  may be obtained from direct shear or triaxial compression tests made on undisturbed samples. The undrained shear strength  $c_u$  may be obtained from triaxial compression tests or from in-situ tests such as the vane shear test.  $\phi'$  represents the angle of shearing resistance in terms of effective stresses and  $C'$  represents the cohesion intercept in terms of effective stresses.

For the wastes, one generally uses  $C' = 0$  and  $\phi'$  comprised between 22° and 34° for coal operations and between 30° and 36° for the other operations.

iii) La déformation

La mesure la plus courante est faite à l'oedomètre donnant:

- la courbe  $e = f(p)$  de variation de l'indice des vides  $e$  avec la pression appliquée  $p$ ;
- la pression de consolidation  $P_c$ ;
- l'indice de compression  $C_c$ ;
- le coefficient de consolidation  $C_v$ ;
- l'indice de compressibilité  $U$ .

Pour des études plus poussées (par exemple, les cas de liquéfaction sous l'effet d'un séisme), on peut déterminer les lois de variation des modules de déformation en fonction de la déformation ou des contraintes appliquées (à l'appareil triaxial ou de cisaillement direct), suivant la même technique que pour les sols.

. Stériles déposés

Les caractéristiques mécaniques des stériles déposés dépendent du mode de dépôt (se référer au Chapitre 4, sections 4.2.2 et 4.2.3).

Lorsque les stériles sont placés au moyen de lances à robinets (spigots) sur une plage non submergée, ils se disposent le long de la plage, les éléments grossiers se déposant les premiers, suivis d'un dépôt selon la grosseur des particules, avec sédimentation des boues (slimes) dans la retenue. La séparation des matériaux dépend du coefficient d'uniformité, ainsi que de la densité et de la quantité de boue (pulp). Il est nécessaire de prédire le mode de séparation des stériles déposés, en ce qui a trait à la grosseur des éléments, à la densité, à la résistance au cisaillement et à la perméabilité. C'est en se basant là-dessus que la méthode de construction est choisie (se référer au Chapitre 4). Des méthodes analytiques, (40 et 41), et empiriques (42) ont été développées pour prédire ces caractéristiques et le mode de séparation. Des résultats positifs peuvent aussi être obtenus par analogie avec des ouvrages existants.

La séparation naturelle des stériles augmente la stabilité des barrages de stériles, vu que des éléments grossiers, possédant un coefficient de résistance plus élevé, sont déposés dans leurs zones extérieures, ce qui améliore la stabilité.

La séparation produit aussi un effet favorable sur la percolation, (39). Les matériaux déposés dans les zones extérieures sont plus perméables, alors qu'ils sont plus imperméables dans les zones intérieures. Le rapport du coefficient de perméabilité dans les zones voisines de la plage, au coefficient à l'extrémité de cette plage, près de l'eau de la retenue peut

iii) For settlement:

The measurement made most often is by an oedometer which gives:

- a curve  $e = f(p)$  of the variation of the void ratio  $e$  as a function of the applied pressure  $p$  ;
- the maximum pre-consolidation pressure  $P_c$  ;
- the compression index  $C_c$  ;
- the coefficient of consolidation  $C_v$  ;
- the degree of consolidation  $U$  .

For more advanced studies (for instance, liquefaction caused by an earthquake), the variation of the deformation moduli may be determined in terms of deformation or applied stresses following the same technique as for soils.

o Deposited Tailings

The mechanical characteristics of the deposited tailings depend on the way in which they are laid; reference should be made to Chapter 4, Sections 4.2.2 and 4.2.3.

When the tailings are spigotted (see Glossary for description) over a non-submerged beach, the coarsest particles are deposited first, followed by a deposition according to grain size, with the slimes settling in the pond. The separation of the material depends on its uniformity coefficient, as well as on the density and quantity of the pulp. It is necessary to predict the separation pattern of the deposited tailings as to coarseness and grain size, density, shear strength and permeability. It is on this basis that the method of construction of a tailings dam is determined (Ref. Chapter 4). Analytical (40, 41) and empirical (42) methods have been developed to predict these characteristics and separation pattern. Positive results can also be obtained by analogy with existing works.

The natural separation of the tailings increases the stability of the tailings dam, since coarser material with a greater potential strength is deposited in its outer zones, which assures the stability.

The separation also has a favourable effect on the seepage (39). The deposited material in the outer zones is more permeable, while it is more impermeable in the inner zones. The ratio of the permeability coefficient at the nearby beach to that at its far end near the pond may vary from 100 to 1000. This produces a lower phreatic surface than in the case of a homogeneous tailings dam.

varier de 100 à 1000. Ceci produit une surface phréatique plus basse que dans le cas d'un barrage homogène de stériles.

Il est important par conséquent que la mise en place par robinets (spigotting) soit bien faite de manière à ce qu'une séparation plus nette puisse être réalisée. Dans le cas de mise en place par robinets submergés (underwater spigotting), la séparation est de beaucoup moins nette et peut parfois être négligée.

Dans le cas des stériles hydrocyclonés la résistance au cisaillement est plus grande, l'angle de résistance atteignant des valeurs de 30° à 40°. La résistance au cisaillement dépend, tout comme la densité, de la méthode de mise en place et du compactage, possible seulement au moyen d'engins de transport ou d'un matériel spécial de compactage.

### 2.3 Propriétés et caractéristiques des terrains de fondation et d'emprunt

Comme il a été indiqué, les propriétés des terrains de fondation et d'emprunt et les moyens pour les obtenir sont identiques à celles considérées et à ceux utilisés pour l'étude d'un barrage hydraulique conventionnel.

Les caractéristiques mécaniques à connaître (d'identification, de résistance et de déformation) sont celles rappelées ci-dessus pour les stériles.

Il convient en plus :

- d'examiner, et au besoin de préciser et d'étudier les modifications qui peuvent être apportées par les stériles aux propriétés et caractéristiques minéralogiques, physiques, chimiques et mécaniques des terrains les supportant;
- de toujours considérer la nocivité possible des eaux de fuite, même en faible quantité.

Comme pour un barrage hydraulique, les terrains d'emprunt peuvent être recherchés pour assurer des fonctions différentes ou combinées de stabilité (forte résistance au cisaillement) et d'étanchéité (perméabilité pratiquement nulle) ou de drainage (forte perméabilité).

### 2.4 Exploration géotechnique

Il ressort de tout ce qui précède que l'exploration géotechnique comporte :

- la reconnaissance géologique et géotechnique du site,
- les essais in situ,
- les essais de laboratoire,
- les données provenant de sites comparables.

It is therefore important that the spigotting be properly done so that a more strongly marked separation can be achieved. In underwater spigotting separation is much less marked and may sometimes be disregarded.

In the case of hydrocycloned tailings the shear strength is greater, the angle of internal friction reaching up to 30°-40°. The shear strength depends, as does the density, on the mode of laying and on compaction which is possible only by transport machines or special compacting equipment.

### 2.3 Properties and Characteristics of Foundations and Borrow Areas

As indicated, the properties of the foundation and borrow areas and the means to obtain them are identical to those considered and used for the study of a water retaining dam.

The mechanical characteristics to be determined (identification, strength and deformation) are the same as those discussed above for wastes.

Furthermore, one should investigate the modifications which may be brought about by the wastes on the mineralogical, physical, chemical and mechanical characteristics of the ground which supports them. The possible harmful effects of leakage water, even in small quantity, should always be considered.

As for a water retaining dam, borrow areas may be selected with a view to ensuring different or combined stability functions (high shear strength) and watertightness (practically zero permeability) or drainage (high permeability).

### 2.4 Geotechnical Investigation

The geotechnical investigation required may be summarized from the above as follows:

- geological and geotechnical reconnaissance on the site,
- in-situ tests,
- laboratory tests,
- data from similar sites.

Les visites de sites faites par un géologue et un géotechnicien permettent de fixer les campagnes de reconnaissance qui leur paraissent nécessaires, par puits, tranchées, galeries, sondages mécaniques, géophysique, etc. (comme indiqué au paragraphe 2.1).

Des essais in situ sont réalisés en partie au moins pendant la campagne de sondage. Ils comportent:

- la mise en place de piézomètres et le relevé de leur niveau à diverses époques de l'année, avant et après les pluies.
- la réalisation au cours des forages et à diverses profondeurs d'essais d'eau, par injection ou de préférence par pompage avec piézomètres de contrôle à diverses distances du puits de pompage.
- des essais dans les sondages (SPT, pénétromètres ou pressiomètres, scissomètres) donnant les résistances en place des terrains étudiés.
- des mesures de la densité en place (au sable, au densitomètre à membrane ou au nucléodensitomètre).

Le programme de forages doit comporter des sondages profonds pour vérifier la présence de gisements de minerai sous-jacents au site proposé et dont l'extraction pourrait affecter la stabilité future.

Tous ces essais sont analogues à ceux réalisés pour un barrage hydraulique. On y ajoute, si possible, l'étude des dépôts de stériles existants, cette étude comportant:

- des sondages avec (comme pour les terrains de fondation) prélèvement d'échantillons intacts dont les caractéristiques de résistance, d'étanchéité, etc., seront comparées en fonction de l'âge des dépôts;
- des essais dans les sondages (perméabilité, SPT, etc.);
- une instrumentation (piézomètres, mesures de la pression interstitielle, mesures des déformations, photographie à intervalles réguliers, etc.) pour suivre le comportement du dépôt;
- l'analyse chimique des effluents.

Ces essais in situ sur les tas de stériles existants sont utilement complétés par toutes les informations fournies par les personnes ayant travaillé sur place et relatives aux méthodes de construction et à l'équipement utilisé, aux observations faites antérieurement, etc.

- 2.5 Les essais de laboratoire pour mesurer les caractéristiques rappelées au paragraphe 2.2, sont tous réalisés suivant les normes ASTM. Ils sont identiques à ceux réalisés pour l'étude d'un barrage hydraulique et bien connus des projeteurs de ces ouvrages.



Site inspections by a geologist and a geotechnical engineer permit them to define and set the investigation programs which in their opinion are necessary by pits, trenches, galleries, mechanical probes and geophysical methods (as indicated in paragraph 2.1).

In-situ tests are carried out, partly at least, during the drilling program. They cover:

- the installation of piezometers to measure existing pore pressures at different times of the year, before and after rainfall seasons;
- in some materials, carrying out water tests at various depths during drilling to determine soil and rock permeabilities by injection or preferably by extraction of water, with control piezometers located at various distances away from the pumping well;
- in-situ tests in boreholes (S.P.T., penetrometers or pressure meters, vane tester) to give strength and deformation parameters of the natural soil;
- measurement of in-situ density (with sand or with membrane densimeter or with a nucleodensimeter);

The drilling program should include deep bores to check on mineral deposits that might lie below the proposed site, the extraction of which could affect future stability.

All these tests are identical to those executed on a water retaining dam. If possible, the study of any existing waste deposits is added, including:

- boreholes with, as for foundation terrain, the collection of undisturbed samples with strength and watertightness characteristics comparable in terms of the age of the dumps,
- tests in the boreholes (permeability, S.P.T.),
- instrumentation (piezometers, pore pressure measurement, deformation measurement, photography at regular intervals) to monitor the dump or deposit during its lifetime,
- chemical analysis of effluent waters.

These in-situ tests performed on the waste deposits are usefully complemented by all the information provided by those who worked on the site and by data on construction methods and equipment used, previous observations, etc.

- 2.5 Laboratory tests to measure the characteristics, discussed in paragraph 2.2 should be made according to ASTM or other recognised national standards. They are identical to those for water retaining dams and well known to the designers of these conventional dams.

En plus des essais réalisés sur les terrains de fondation et d'emprunt, l'étude de laboratoire doit porter sur les stériles et déterminer leurs modifications chimiques et minéralogiques et les variations de leurs caractéristiques en procédant, si possible, à des mesures sur des échantillons prélevés dans des dépôts plus ou moins anciens. On procède aussi à des essais en laboratoire, sur des échantillons préalablement soumis à un vieillissement accéléré. De tels essais (cycles de mouillage/séchage et de gel/dégel, ou attaques par acide ou tout autre produit agissant sur les stériles) ne donnent pas, le plus souvent, la résistance finale à escompter et à prendre en compte dans les calculs de stabilité, mais ils indiquent les risques d'altération et permettent de rechercher les moyens d'y remédier ou de la retarder.

Ces essais de vieillissement accéléré ne doivent pas être substitués à l'étude des caractéristiques et du comportement des tas de stériles anciens; ils en constituent un complément toujours utile.

Toute l'exploration géotechnique doit être suivie, classée et présentée par un observateur expérimenté, capable de modifier le programme des reconnaissances pour l'adapter aux conditions rencontrées au site.

Bien qu'il y ait une analogie entre certains aspects des barrages hydrauliques et de stériles, les exigences spécifiques pour la conception des barrages de stériles requièrent une connaissance spécialisée et une expérience dans ce domaine.

In addition to tests made on foundation and borrow areas, laboratory studies should cover the wastes themselves and determine their chemical and mineralogical modifications along with variations in their characteristics, if possible, by measurements on samples collected in existing deposits (or dumps). These should be as old as possible, consistent with being composed of the same type of material to be put in the structure being designed. Laboratory tests may also be performed on samples previously subjected to accelerated pre-ageing. Such tests (wetting-drying cycles, freezing-thawing cycles, or acid attacks or any other product or substance acting on the tailings) do not give, in most cases, the expected final strength to be considered in the stability calculations. They indicate, however, the alteration risks and provide the data needed to search for means to correct and delay the alteration.

The accelerated ageing tests are not intended to substitute determination of the characteristics and behaviour of old waste embankments. These embankments are always a useful complement to the accelerated tests.

The geotechnical investigation should be followed, classified and presented by an experienced observer, capable of modifying the investigation programs to adapt them to the conditions found on the site.

While there is similarity between certain aspects of water retaining and tailings dams, the specific design requirements for the latter requires specialised knowledge of engineers experienced in this field.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- F. Baguelin, J.F. Jézéquel, D.H. Shields "The Pressuremeter and Foundation Engineering"  
Trans Tech Publications - 1978
- 2- J. Biarez, Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents"  
Thèse - Université de Grenoble - 1962
- 3- A.W. Bishop et DJ Henkel  
"The Measurement of soil properties in the triaxial test"  
London 1957
- 4- H. Cambefort, "Introduction à la Géotechnique" - Eyrolles 1971  
"Géotechnique de l'Ingénieur" - Eyrolles 1972
- 5- Canmet, Canada - Centre for Mineral and Energy Technology"  
Pit Slope Manual - Chap. 9 Waste Embankments
- 6- A. Caquot, "Equilibre des massifs à frottement interne"  
Gauthier-Villars - 1934
- 7- A. Caquot et J. Kérisel, "Traité de Mécanique des Sols"  
Gauthiers-Villars - 4<sup>e</sup> Edition - 1966
- 8- M. Cassan, "Les essais in situ en mécanique des sols" - Tome 1 et 2  
Eyrolles - 1978
- 9- G. Castany, "Traité pratique des eaux souterraines"  
Dunod - Paris 1967
- 10- Chow, Ven Te, "Handbook of applied hydrology"  
Mc Graw-Hill - 1964
- 11- A. Collin, "Recherche expérimentale sur les glissements spontanés des terrains argileux, accompagnée de considérations sur quelques principes de mécanique terrestre"  
Carilian-Goeury - Paris 1846
- 12- J. Costet et G. Sanglerat, "Cours pratique de mécanique des sols -  
1) Plasticité et calcul des tassements - 2) Calcul des ouvrages  
Dunod - 1975
- 13- Cours de mécanique des sols à l'E.N.P.C., (MM. J. Legrand,  
Schlosser, Pilot et al ....)
- 14- J.P. Giroud, "Tassement et stabilité des fondations superficielles"  
Presses Universitaires de Grenoble (1975)

- 15- J.P. Giroud, "Table pour le calcul des fondations"  
Volumes 1 et 2 - Dunod 1972
- 16- G. Filliat, "La pratique des sols et fondations"  
Editions du Moniteur - Paris 1981
- 17- P. Habib, "Précis de Géotechnique"  
Dunod - 1973
- 18- T.W. Lambe, "Soil Testing for Engineers"  
John Wiley - N.Y. 1951
- 19- T.W. Lambe and R.V. Whitman, "Soils Mechanics"  
John Wiley and Sons - N.Y. 1969
- 20- G.A. Leonards, "Les Fondations"  
Dunod - 1968
- 21- Professeur Ch. Levêque - Université de Bordeaux I, "Géologie  
appliquée au Génie Civil - au Génie Nucléaire et à l'environnement"  
(en cours d'impression)
- 22- CH. Mallet et J. Pacquant, "Les barrages en terre"  
Eyrolles - Paris 1951
- 23- A. Mayer, "Précis de mécanique des sols"  
3ème édition - A. Colin 1959
- "Les terrains perméables"  
Dunod - 1947
- 24- G. Millot, "Relation entre la constitution et la génèse des roches  
argileuses"  
Géologie appliqu e et prospection minière - 1949
- 25- R. Peltier, "Manuel de laboratoire routier"  
Dunod 1954
- 26- Post et Londe, "Les barrages en terre compact e"  
Gauthiers-Villars 1953
- 27- G. Sanglerat, "Le pénétromètre et la reconnaissance des sols"  
Dunod - 1965
- 28- G. Schneebeli, "Hydraulique souterraine"  
Eyrolles - 1966
- 29- H. Schoeller, "Les eaux souterraines"  
Masson et Cie - Paris - 1962
- 30- Sherard, Woodward, Gilzienski and Clevenger, "Earth and rock fill  
dams"  
John Wiley and Sons - N.Y. 1963
- 31- D.W. Taylor, "Fundamentals of Soil Mechanics"  
John Wiley and Sons - N.Y. 1956

- 32- G.P. Tschebotarioff, "Soils Mechanics Foundations and Earth Structures"  
Mac Graw Hill - N.Y. 1952
- "Foundation, Retaining and Earth Structures"  
2<sup>e</sup> Edition - 1973
- 33- K. Terzaghi, "Mécanique théorique des sols"  
Dunod - 1951
- 34- K. Terzaghi et R. Peck, "Mécanique des sols appliquée"  
Dunod - 1957
- 35- J. Verdeyen, V. Voisin, J. Nuyens, "La mécanique des sols"  
Dunod - 1968
- 36- F.C. Walker, J.W. Hilf, W.W. Daehn, W.G. Holtz, A.A. Wagner et H.I. Gibbs, "Earth Manual"  
Bureau of Reclamation - Denver - Colorado
- 37- Ph. d. wayne, C. Teng, "Calcul des fondations et des murs de soutènements"  
Eyrolles - 1966
- 38- Hans F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang, "Foundations Engineering Handbook"  
V.N.R. - N.Y. 1975
- 39- Abadjiev C.B. (1976), Seepage Through Mill Tailing Dams  
Douzième Congrès des Grands Barrages, Mexico, 1976, vol. 1,  
pp 381-394
- 40- Melentiev V.A., N.P. Kolpashnikov and B.A. Volnin, "Hydraulically filled hydraulic structures", Ed. "Energy", Moscow, 1973
- 41- Provisional instructions for the construction technology of spigotted mill tailings dams (RSN 275 - 75) Ed. Gosstroï, Kiev, 1975 (in Russian)
- 42- Instructions for the evaluation of the mechanical characteristics of the materials in tailings dams, Ed. MEHANOBR, Leningrad, 1979 (in Russian)
- 43- A.S.C.E.  
Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials - June 1976 - 1977
- 44- Y. Atlan, M. Desurmont, JM Vagneron  
Stériles et déchets miniers des digues à stériles  
BRGM - Rapport n° 78 SGN 570 GEG
- 45- F. Baguelin et JF Jézéquel  
Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents  
Bulletin de liaison du L.P.C. n° 51

- 46- Barres M. et al. (1978)  
Étude du comportement hydrodynamique et de l'évolution chimique des déchets miniers fins en décharge.  
Journées d'Études sur l'Environnement, BRGM, 1978
- 47- J. Biarez, M. Cassa, M. Meunier, A. Tontoni  
Contribution à l'étude des pénétromètres statiques et dynamiques  
Symp. Européen sur les essais de pénétration - Stockholm  
1974
- 48- L. Bjerrun  
Fundamental consideration on the strenght of soils  
Geotechnique - Vol. II - 1951
- 49- Brandela M.  
Stockage, stabilisation et valorisation des résidus de l'industrie minérale  
Industrie Minérale
- 50- J. Brinch Hansen  
Vane tests in a novegian quick-clay  
Geotechnique - Vol. 2 - 1950
- 51- Casagrande L. (1974)  
Design and Construction of Tailings Dams dans Stability in open Pit Mining  
Brawner C.O. et Miligan V. Editeurs - pp. 181-204
- 52- Chafet A.B. (1975), Guidelines for Designing, Constructing and Operating Tailings Dams and Ponds  
EM/J, décembre 1975, pp. 89-90
- 53- Department of Energy, Mines and Resources (1972)  
Tentative Design Guide for Mine Waste Embankments in Canada  
Technical Bulletin TB 145, Mines Branch Mining Research Center, Ottawa, 1972
- 54- Dobry R. y Alvarez, L. (1967)  
Seismic Failures of Chilean Tailings Dams  
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, Division, ASCE, vol. 93, n° SM6, pp. 237-260
- 55- Down C.G. et Stocks J. (1976)  
The Environmental Problems of tailings disposal at metal mines  
Department of the Environment Research, Report n° 17, Royaume Uni
- 56- Florida Statutes, Rules of the Department of Pollution Control, chapitre 17-9 (1972) "Minimum Requirements for Earthen Dams and Phosphate Mining and Processing Operations" - Tallahassee, Floride
- 57- Galpin A.L. (1971)  
The control of water in tailings ponds  
Second International Conference on Stability in Open Pit Mining, Vancouver, Nov. 1971, pp. 173-196.

- 58- Goodman R.E. et Seed H.B.  
Earthquake Induced Displacements in sand Embankments  
Journal of the Soil Mechanics and Foundations  
Division, ASCE, Vol. 92, n° SM<sup>2</sup>, 125-146
- 59- Hamel V.J. et Gunderson (1973)  
Shear Strength of Homestake Slimes Tailings  
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division,  
ASCE, Vol. 99, n° SMS, Mai 1973, pp. 427-432.
- 60- Hird C.C. et Humphreys J.D (1977)  
An experimental scheme for the Disposal of Micaceous Residues from  
the China Clay Industry  
Quarterly - Journal of Engineering Geology, vol. 10,  
pp. 177-194
- 61- Holubec I. (1976)  
Geotechnical Aspects of Coal Waste Embankments  
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, pp. 27-39
- 62- Jezequel J.F.  
Les pénétrètres statiques, influence du mode d'emploi sur la  
résistance en pointe.  
Bulletin de Liaison des LPC - n° 36 - Janvier 1969
- 63- Jezequel JF, Pinel M., Ravillay G.  
Pénétrètre électrique à mesure continue  
Bulletin de Liaison des LPC - n° 36 - Janvier 1969
- 64- Kleiner D.E. (1976)  
Design and Construction of an Embankment Dam to Impound Gypsum  
Wastes  
Douzième Congrès des Grands Barrages, Mexico, Vol. 1,  
pp. 235-250
- 65- Klohn E.J. (1972)  
Tailings Dams in British Columbia  
Geotechnical Practice for Stability in Open Pit Mining  
Brawner C.O. et V. Milligan Editeurs, pp. 151-172
- 66- Klohn E.G. et Maaetman C.H. (1972)  
Construction of Sound Tailings Dams by spigotting  
Tailing Disposal Today, L. Aplin et G.O. Argall Editeurs,  
pp. 237
- 67- P. Laréal, G. Sanglerat, J. Gielly  
Comparaison des essais de pénétration effectués avec différents  
pénétrètres statiques et dynamiques.  
Correlations between in situ penetrometer tests and the  
compressibility characteristics of soils - Londres 1969  
Symp. Europ. sur les Essais de pénétration - Stockholm  
1974
- 68- L.C.P.C.  
Essai statique de fondations profondes  
Dunod 1970



- essai pressiométrique normal  
Dunod 1971
- Le tassomètre pour la mesure des tassements  
Dunod 1971
- Essais de plaque et mécanique des chaussées  
Bulletin de Liaison des LPC - Février 1965
- 69- Leon J.L. (1976)  
Seismic Analysis of a Tailings dam  
Douzième Congrès des grands barrages, Mexico, 196, vol. 1,  
pp. 211-234
- 70- Londe P., Guerber P., Laplace G. et Poutot G. (1976)  
Barrage de Berrien pour le stockage des stériles  
Douzième Congrès International des Grands Barrages,  
Mexico, 1976, Vol 1, pp. 19-32
- 71- L. Menard  
An apparatus for measuring the strenght of soils in place  
Thèse - Université de l'Illinois - 1956  
Mesure in situ des propriétés physiques des sols -  
Annales des Ponts et Chaussées - Mai 1957  
Calcul de la force portante des fondations sur la base des  
résultats des essais pressiométriques  
Sol-Soils - Vol. II n° (1963)
- 72- G.G. Meyerhoff  
Penetration test and bearing capacity of cohesionless soils  
Proc. ASCE - Vol. 82 - SM1 et SM3 - 1966
- 73- Morgenstern N.R. and V.E. Price  
The analysis of the stability of general slep surface  
Geotechnique - Juin 1965
- 74- Newmark N.M. (1965)  
Effects of Earthquake on Dams and Embankments  
Geotechnique - Vol. 15, n° 2, pp. 139-160
- 75- Pettibone H. et dankealy C. (1971)  
Engineering Properties of Mines Tailings  
Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,  
ASCE, Vol. 97 n° SM9, Septembre 1971, pp. 1207-1226
- 76- R.R. Proctor  
The design and Construction of rolled earth dams  
Engineering New Record - Août 1933
- 77- Raffinot P., Gistau H., Casalis J.A. et Audoli H. (1972)  
Construction des aires d'épandage des rejets des laveries de  
flottation  
Revue de l'Industrie Minérale/Mineralurgie, n° 3,  
pp.116-134
- 78- Robinsky E.I. (1975)  
Thickened Discharge - A new approach to tailings disposal  
CIM Bulletin, Décembre 1975, pp. 47-53

- 79- G. Sanglerat  
Pénétrromètre statique et dynamique - Le pénétrromètre statique et la  
prévision des tassements.  
Séminaire CAST - INSA Lyon 1971
- 80- G. Sanglerat et Lareal  
State of the Art in France  
Symp. Europ. sur les essais de pénétration - Sotckholm  
1974
- 81- Seed H.B.  
A method for earthquake resistant design of earth dams  
Journal Soils Mechanics and Foundations Division - ASCM  
Janvier 1966
- 82- Seed H.B., Lee K.L. et Idriss I.M.  
Analysis of Sheffield Dam Failure  
Journal of the Soil Mechanics and Foundation engineering  
Division, ASCE, Vol. 95, n° SM5, pp. 1199-1218
- 83- Seed H.B., Lee K.L., Idriss I.M. et Makdisi F. (1973)  
Analysis of the slides in the San Fernando Dams during the  
earthquake of Feb. 9, 1971  
Rapport n° EERC 73-2, Université de Californie, Berkeley
- 84- Shields D.H. (1975)  
Innovation in tailing disposal  
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, pp. 320-325
- 85- Soderberg R.L. et Busch R.A. (1977)  
Design Guide for metal and nonmetal tailings disposal  
U.S. Bureau of Mines, IC 87 55
- 86- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1974)  
Design of small dams  
Second Edition
- 87- Wahler W. et Schlick D.P. (1976)  
Mine refuse impoundments in the United States  
Douzième Congrès des Grands Barrages, Mexico, Vol. 1,  
pp. 279-320
- 88- Standard Soils Testing Methods published by:  
- ASTM (American Society for Testing and Materials)  
- C.S.A. (Canadian Standards Association)
- 89- Laboratory Soils Testing (1952) published by the U.S. Army Corps of  
Engineers
- 90- Tailings Disposal Today, Proceedings of the First (Tucson, Arizona,  
1972) and the Second (Denver, Colorado, 1978) International Tailing  
Symposium.
- 91- Comptes rendus du 12ème Congrès International des Grands Barrages  
- Mexico 1976 - Vol. 1 - Question 44.



### 3. CONCEPTION

Ce chapitre, traitant de la conception des remblais de stériles, offre au lecteur une brève revue de ce qui doit être examiné avant de procéder à la construction d'un ouvrage de stériles. De nombreux livres et articles ont été consacrés aux aspects particuliers du problème. Ce chapitre n'a donc pour objectif que d'en faire ressortir les aspects importants et de guider le lecteur vers une documentation plus détaillée au moyen de références.

#### 3.1 Introduction

##### 3.1.1 Généralités

Les dépôts de stériles constituent un des facteurs les plus importants dans la mise en valeur des ressources en minerais à faible teneur. La localisation des usines se fait par une analyse de coût dans laquelle la mise en dépôt des stériles peut en certains cas constituer l'élément déterminant. Les considérations d'environnement ainsi que d'autres facteurs tels la disponibilité de grandes étendues de terrain, l'eau, les centres de population, contribuent à la localisation des dépôts de stériles.

De grandes difficultés et des coûts élevés sont souvent attribuables à la pratique de concevoir des barrages de stériles en se basant sur les résultats d'exploration amassés à un moment donné. Habituellement, quelques années plus tard, de nouvelles réserves de minerai sont découvertes; on a recours alors à l'expédient d'agrandir le barrage conçu à l'origine. Si, au cours des phases initiales des études, on néglige de prévoir une étape ultérieure probable, sa réalisation devient impossible ou beaucoup plus onéreuse, alors que l'équipement de ces ouvrages (tours de décantation, collecteurs, évacuateurs, digues et canaux de dérivation, routes, instrumentation, etc.) doit être doublé. C'est pourquoi il importe dans la conception d'un barrage de stériles pour un site donné de prévoir l'utilisation maximale du site, tout en s'assurant que les étapes successives s'adaptent aisément aux précédentes, sans occasionner des problèmes majeurs et des augmentations de coûts.

Le type de dépôt de stériles adopté est déterminé en règle générale par l'activité sismique, la clarification de l'eau, les propriétés et la stabilité des stériles, les conditions de fondation, les conditions hydrologiques, la distribution des stériles et les considérations d'environnement.

Les considérations ayant trait à l'environnement, dont on doit tenir compte dans l'estimation des coûts, sont le contrôle des poussières, les eaux de percolation, le contrôle de la pollution et la compatibilité de la topographie.

### 3. DESIGN

This chapter on tailings embankment design offers the reader a brief overview of what must be considered by a designer before the tailing structure is built. Numerous books and articles have been devoted to the specifics of tailing design. Therefore, it is intended to highlight important aspects and lead the reader to more detailed literature through the footnotes.

#### 3.1 Introduction

##### 3.1.1 General

Tailing embankments, dumps or impoundments, are one of the major cost factors in the beneficiation of low grade resources. Plant locations are chosen on a cost analysis in which tailing disposal can and has determined the location of the beneficiation plant. The environmental considerations, and other factors such as large land availability, water and population centres are all used to determine the location of the tailing embankments.

Great difficulties and high cost often arise from the practice of designing tailings dams of a size based on investigation results gathered at a given moment. Usually, a few years later, new ore deposits are discovered and it becomes expedient to enlarge the originally designed dam. If, in the early stages of the design, the second possible stage is not planned for, its implementation is either impossible or much more costly, while the tailings dams equipment (decant towers, collectors, spillways, diversion dikes and channels, roads, measuring instruments) must be doubled. That is why it is pertinent when designing a tailings dam for a given site, to plan for the maximum possible utilization of the site, successive stages fitting easily into the previous ones, without major problems and cost increases.

The type of tailing embankment used is generally determined by seismic activity, water clarification, tailings properties and stability, foundation conditions, hydrological conditions, tailing distribution and environmental considerations.

Environmental consideration for a cost estimate would include such factors as dust control, seepage water, pollution control and topography compatibility.

Le transport des stériles et leur distribution peuvent être déterminants dans le choix du type de dépôt ou réciproquement le type de dépôt peut déterminer le type de distribution des stériles. Le coût de transport et distribution peut être évalué pour les diverses méthodes de transport et mise en dépôt.

Dans les régions froides, des investissements et des coûts d'exploitation additionnels sont à prévoir pour tenir compte des conditions de gel et dégel.

Il est assez fréquent, une fois établie l'estimation initiale des coûts, qu'une combinaison de concepts de retenues s'avère la plus économique des solutions. Cette combinaison démontre habituellement que l'étalement des investissements aura pour effet de réduire les coûts. L'estimation des coûts de transport et distribution des stériles, conjointement avec les coûts du terrassement et des mesures d'environnement indique habituellement le type de retenue de stériles à construire.

Ayant décidé du type de dépôt, il faut en déterminer les dimensions, les procédures d'opération, ainsi que la conception du remblai. Le dépôt dans son ensemble inclut en général plusieurs cellules. Ceci se fait pour des raisons de souplesse et pour satisfaire aux contraintes d'exploitation. Le dépôt de stériles a d'autres fonctions que le simple entreposage de résidus; il sert également à la clarification de l'eau et parfois comme réservoir d'eau pour l'exploitation de l'usine.

### 3.1.2 Qualifications du concepteur

Très peu nombreux sont les pays à émettre actuellement des certificats de concepteurs de barrages de stériles. Cependant, tous plans ayant trait à la question doivent porter l'estampe d'un ingénieur dûment reconnu; il est entendu que l'ingénieur doit posséder des connaissances en mécanique des sols, hydrologie, fondations ou travaux miniers. Bien que la conception des barrages de stériles miniers puisse ne différer aucunement de la conception de n'importe quel autre ouvrage, le concepteur doit être conscient de certaines considérations majeures qui caractérisent ces ouvrages relativement aux barrages de retenue hydraulique, par exemple.

### 3.1.3 Caractéristiques des barrages de stériles

Un barrage conventionnel est construit à l'aide de matériaux spécifiques bien contrôlés aux fins de retenir une masse d'eau. Un barrage de stériles, pour sa part, est construit de matériaux de rebut, d'emprunt, de matériaux provenant de procédés miniers, ou encore de combinaisons de ces matériaux conçues pour retenir des solides et de l'eau. La plupart des remblais, lorsque réputés structurellement ou économiquement rentables, utilisent des stériles provenant de procédés miniers ou industriels, liant ainsi intimement remblai et retenue. Il s'agit alors de mort-terrain (ou sols de surface) ou de stériles industriels (graded mill waste). Étant donné que la vie utile des barrages de stériles s'accroît constamment jusqu'à ré-insertion dans l'environnement, les horizons physiques dans le remblai peuvent varier selon les changements en cours dans la mine et selon les procédés utilisés. Les stériles indus-

Tailing transportation and distribution can determine the type of embankment or the type of embankment may determine the type of tailing distribution. The cost of tailing transportation and distribution can be assessed according to several methods of transportation and deposition.

In cold regions added capital and operational costs are estimated to cover freezing and thawing conditions.

It is quite common, after the initial cost estimate, that a combination of impoundment designs will prove the most economical. It usually shows that the delaying of capital expenditures will reduce the cost. The cost estimate of the tailing transportation and distribution in conjunction with the embankment and environmental costs usually indicate the type of tailing impoundment to be built.

Having decided on the type of tailing embankment, the engineer must determine the size, height, operational procedure and detail design. The total embankment generally will include several cells, for flexibility and as an operational necessity. The tailing embankment has other functions than the storage of tailings. It is also used for water clarification and sometimes as a water reservoir for the operation of the plant.

### 3.1.2 Designer Qualification

Few, if any countries, presently specifically certify tailings dam designers as such. However, tailings plans should be made by professional engineers; the engineer should be knowledgeable in soil mechanics, hydrology, foundation design and have some knowledge of mining. Although designing tailing dams maybe no different from designing any other structure, there are major considerations which the designer should be aware of that make the tailings dam different from the water retaining dam.

### 3.1.3 Tailing Dam Characteristics<sup>(1)</sup>

The conventional dam is built of specified, controlled material to impound water. A tailing dam, on the other hand, is built of waste, borrow, mill processed material or a combination of any of these to impound solids and water. Most embankments, when shown to be structurally and economically feasible, use waste from the mining or milling process, making embankment and impoundment intertwined. This is in the form of overburden or graded mill waste. Because the useful life of the tailing dam is constantly growing to a planned abandonment, the physical horizons in the embankment may vary with changing mine and mill processes. Mill tailing, the waste product of removing the ore from the body, is a crushed and screened material taking on the characteristics of clay, sand or silt, depending on the parent rock. The tailing ranges anywhere from 5 per cent solids by weight for dewatering treatment to 50 per

triels, c'est-à-dire le produit de rejet restant après l'extraction du minerai, est un matériau concassé et tamisé présentant les caractéristiques de l'argile, du sable ou du silt selon le rocher d'origine. Les stériles varient entre une teneur en poids de 5% en solides pour les cas d'assèchement et une teneur de 50%. Cette grande quantité d'eau est accumulée de préférence à l'arrière de la retenue, à fin d'éviter la présence d'eau libre au barrage proprement dit, et pour en permettre la recirculation vers l'usine ou son évaporation. Etant donné la faible densité en place des stériles, la liquéfaction est possible et doit constituer un sujet d'attention majeure dans une zone sismique. Le matériau stérile peut aussi contenir des substances corrosives provenant de procédés industriels tels que le délavement au sulfure, lequel affecte le drainage et les systèmes d'entreposage.

Il y a aussi des considérations spécifiques dont le concepteur doit être conscient et qui affectent la conception des barrages de stériles selon le minerai extrait de la mine. Les considérations spécifiques aux minerais les plus courants sont:

1. Charbon<sup>2</sup>

- a. combustion spontanée;
- b. pyrites et attaque à l'acide.

2. Métaux non-ferreux<sup>1</sup> (cuivre, molybdène, plomb et zinc):

- a. envergure des opérations de disposition, lesquelles atteignent parfois 26 km<sup>2</sup> ;
- b. fraction 200-M allant jusqu'à 80%

3. Taconite<sup>1</sup>:

- a. ampleur des opérations atteignant jusqu'à 15 km. carrés;
- b. possibilité de fibres dans le stérile, les normes pour l'air et l'eau devenant une question sérieuse.

4. Uranium<sup>3</sup>:

- a. dangers du radon;
- b. débit nul d'eaux libres ou de ruissellement en provenance des stériles.

D'autres minerais tels que les phosphates et les schistes bitumineux (shale oil) possèdent des caractéristiques qui doivent être considérées dans la conception des barrages de stériles.

5. Or

- a. jusqu'à 90% passant le tamis 200;
- b. faible étalement de la granulométrie;
- c. très souvent acide.

6. Autres - Voir paragraphe 2.2.1.



cent solids. This vast amount of water is collected, preferably at the back of the impoundment, to avoid freewater at the dam itself, and for recirculation to the mill or evaporation. Because of low in-place density of the tailing, liquefaction is possible and must be a major concern in a seismic area. Tailing may also contain corrosive materials, introduced through mill processes such as sulphide leaching, which affect drainage and impoundment systems.

There are also specific considerations the designer must be aware of which affect the tailing dam design based on the commodity mined. Specific requirements may apply in various countries. Properties of some of the major ores are listed below:

1. Coal<sup>(2)</sup>:

- a. Spontaneous combustibility.
- b. Pyrites and acid leach.

2. Non-ferrous metals<sup>(1)</sup> (copper, molybdenum, lead, zinc):

- a. Size of tailing operations often reaching 26 square kilometers.
- b. Up to 80 per cent minus 75  $\mu$ m fraction (or 0.075 mm).

3. Taconite<sup>1</sup>:

- a. Size of tailing operations ranging up to 15 square kilometers.
- b. Fibres in tailing possible, making air plus water pollution a serious consideration.

4. Uranium<sup>3</sup>:

- a. Radon and radiation dangers.
- b. Zero discharge of tailing, supernatant or run-off waters. In some countries discharge and seepage are allowed (3, 96, 97).

Other substances such as phosphate<sup>2</sup> and shale oil possess characteristics which must also be considered in tailing dam design.

5. Gold:

- a. Up to 90% minus 75  $\mu$ m (or 0.075 mm).
- b. Low spread of particle size.
- c. Very often acidic.

6. General - see paragraph 2.2.1.

#### 3.1.4 Mise en dépôt des stériles miniers <sup>4,5,6</sup> :

L'accident de Buffalo Creek<sup>6</sup> constitue un événement significatif souvent mentionné par les mineurs aux États-Unis. Jusqu'alors la mise en dépôt des rejets miniers était considérée comme un "art obscur". À la suite de Buffalo Creek et de la catastrophe d'Aberfan, au Pays de Galles, en 1966, des lois et règlements ainsi qu'une agence, la Mine Safety and Health Administration, Department of Labour, furent introduites aux États-Unis. En Grande Bretagne, des contrôles ont été imposés dans le cadre de la loi "Mines and Quarries (Tips) Act, 1969". (Les détails sont présentés au Chapitre 5).

L'importance de la recherche ainsi que les études scientifiques ont augmenté au fur et à mesure des progrès des techniques de mise en dépôt des stériles.

Il y a différents types de dépôts, chacun possédant des caractéristiques propres dont le concepteur doit tenir compte, tels les dépôts de stériles, les tas de terre et de déchets rocheux, les résidus de filtration (leach dumps) les dépôts provenant des usines de préparation (preparation plant wastes), les dépôts de charbon propre. Le dépôt de stériles miniers peut contenir très peu ou pas de minerai et être constitué simplement de mort-terrain ou couches de séparation dans le cas de gisements de type sédimentaire. Lorsque le minerai est en faible concentration, le dépôt de rejets peut être attaqué chimiquement et de ce fait, ses caractéristiques structurales peuvent subir des altérations. Les retenues de stériles industriels utilisent des rejets de mines, des matériaux d'emprunt et du sable stérile pour bâtir le remblai. Les boues (slurry) industrielles sont déposées de différentes manières selon les méthodes amont, aval et centrale tel qu'expliqué dans le chapitre 5 - Construction et exploitation de ce manuel. Si le remplissage de la mine est prévu, du matériau sableux sera dérivé depuis la retenue des boues vers la mine pour le confortement des gradins souterrains, réduisant ainsi les affaissements du terrain. Mais ce faisant on peut réduire la stabilité du remblai de stériles. On construit des digues de retenue pour contenir des stériles à haute teneur en eau tels que les phosphates. Ces boues peuvent n'avoir qu'une densité de 4% (4g de solides pour 100g de poids total), ce qui entraîne l'obligation de considérer ces digues comme des barrages conventionnels.

On doit s'attacher à rechercher des utilisations secondaires des stériles miniers; l'utilisation systématique de ce matériau peut entraîner éventuellement la démolition du barrage de retenue. Quelques utilisations qui jusqu'à présent se sont avérées économiques sont: agrégats pour la construction de routes, céramique, chaux en agriculture, enrichissement des sols et production de briques.

#### 3.1.5 Données conceptuelles requises

Le concepteur doit être préoccupé par les aspects qui ne sont pas directement en rapport avec la construction du barrage proprement dit, mais qui néanmoins affectent lourdement sa décision. Les tonnages journaliers de matériaux en provenance des mines, la miné-

#### 3.1.4 Mine Refuse Disposal<sup>4,5,6</sup> :

A significant event with respect to waste disposal in the United States, that many mine personnel point to, occurred at Buffalo Creek<sup>6</sup>. A West Virginia rainstorm, in 1972, preceded sudden failure of a coal refuse impoundment, causing extensive damage and deaths. Up to that point, mine refuse disposal was considered a black art. Because of Buffalo Creek and the disaster that occurred at Aberfan, Wales, in 1966, regulations and regulatory agencies, relating to tailings disposal have been set up in many countries of the world. Thus, the Mine Safety and Health Administration of the Department of Labour, was incorporated in the United States. In Britain, control was introduced through the Mines and Quarries (Tips) Act 1969. (Further details are given in Chapter 5). Research and scientific endeavours have increased with advances in mine tailing disposal techniques.

There are different types of mine waste deposits, each with varying characteristics a designer must consider, such as: tailing impoundments, overburden and waste rock stockpiles, leach dumps, preparation plant wastes and clean coal stockpiles. The mine waste dump can contain little or no ore and is merely the overburden or separating layers in the case of sedimentary type deposits. Where ore is present in low concentrations, the waste dump may be leached and, in so doing, the structural characteristics may be altered.

Mill tailing impoundments use mine waste rock, borrow material, or tailing sand to build the embankment. Mill slurry is deposited in various ways, such as the upstream, downstream, and centreline methods explained in the construction section of this manual. If backfill of the mine is being planned, sandy material will be diverted from the slurry impoundment to the mine giving the underground stopes increased stability to decrease ground subsidence. But by doing so, one may decrease the stability of the tailing building material.

Retention dams are built around high water content tailings such as phosphate. These slurries could range in the 4 per cent pulp density making the tailing embankment a water retention dam.

Secondary uses of mine wastes should be considered since a popular use of the material can eventually lead to dismantling of the impounding dam. Some uses which have so far proved economical are: road aggregate, ceramics, agricultural lime, soil nutrients and bricks.

#### 3.1.5 Basic Design Data Requirements

The designer must be concerned with aspects which are not directly related to the dam structure itself, but nonetheless may heavily influence his decision. Daily tonnages of mined material, the mineralogy of the material, and features of the milling operation,

ralogie de ces matériaux, ainsi que les caractéristiques du procédé industriel, telles que le flux opérationnel et l'analyse au tamis, ont tous un impact direct sur le remblai.

Le choix des sites, dont il est question au Chapitre 2, est une entreprise majeure pour le concepteur. La topographie doit permettre une montée annuelle contrôlée des stériles en arrière du remblai. L'impact des remblais et des dépôts sur l'environnement doit être considéré, tout comme les limites physiques et économiques des atteintes aux personnes et aux biens en cas de rupture de l'ouvrage.

Un étude détaillée des fondations doit être menée pour permettre d'assurer la stabilité du remblai. Un problème de plus en plus fréquent résulte de creusages en-dessous d'un remblai actif ou inactif. La résistance des formations géologiques entre les dépôts et les zones de travaux miniers est un sujet de préoccupation majeure car il importe d'éviter des affaissements pendant les activités de la mine.

L'analyse des précipitations annuelles, des averses, des débits des cours d'eau, du ruissellement saisonnier, de même que des graphiques de température doit être tenue à jour. Des systèmes de dérivation, des cuvettes de sédimentation et un contrôle de l'érosion ne sont plus des questions facultatives et font partie des lois et règlements. L'étude soignée des débits à travers l'ouvrage de retenue est exigée pendant la durée des opérations minières jusqu'à une éventuelle ré-insertion dans l'environnement.

Les règlements doivent définitivement être une des préoccupations primordiales du concepteur. Aux États-Unis, par exemple, il y a des lois locales, d'état et fédérales dont il faut tenir compte. Selon le propriétaire du terrain, l'état dans lequel est située la mine, quelques unes des agences responsables des opérations minières et des règlements établis sont:

- o La Nuclear Regulatory Commission
- o Bureau of Indian Affairs
- o Mine Safety and Health Administration
- o Historic Preservation
- o Office of Surface Mining
- o National Park Service
- o Environmental Protection Service
- o Bureau of Land Management
- o Fish and Wildlife
- o Forest Service

Des permis, des études et des demandes doivent être obtenus avant toute première pelletée de terre et le concepteur doit veiller à ce que son remblai soit en conformité avec toutes les restrictions de sécurité, sanitaires, d'environnement et économiques, de son pays.

Nombreux sont les pays pouvant avoir des lois et règlements spécifiques qu'on doit s'attacher à étudier et respecter.

such as the mill flow sheet and screen analysis, all have a direct impact on the embankment.

Site selection, also dealt with in Chapter 2, is a major undertaking for the designer. Topography must allow a controlled annual rise of tailing behind the embankment. The environmental impact of the embankment and impoundment must be considered as must the mass flow boundary--the physical and economic limits of damage to lives and property, should the facility fail.

A thorough foundation soil study must be completed to ensure the embankment stability. An increasingly seen problem is mining under an active or inactive tailing embankment. Whether or not the strength of the soil between the impoundment and the mine workings is sufficient to avoid subsidence during activity is a major concern.

An analysis of annual and storm precipitation, stream flow, seasonal runoff, and temperature charts must be accomplished. Diversion systems, sedimentation ponds, and erosion control are no longer optional and are called for in regulations. Careful study of water flow through the impoundment structure is required before the facility is built, during the life of the mining operation, and after eventual abandonment.

Regulations most definitely must be a prime consideration for the designer. In the United States, for example, there are federal, state, and local laws to contend with. Depending on who owns the land and what state the mine is in, some of the agencies responsible for mining operations and regulations in the United States are:

- o Nuclear Regulatory Commission
- o Bureau of Indian Affairs
- o Mine Safety and Health Administration
- o U.S. Geological Survey
- o Historic Preservation
- o Office of Surface Mining
- o National Park Service
- o Environmental Protection Service
- o Bureau of Land Management
- o Fish and Wildlife
- o Forest Service

Permits, studies, and applications must be obtained before a shovelful of dirt is moved and the designer must see that his embankment conforms to all safety, health, environmental and economical restrictions.

Other countries may have their own specific regulations which must be studied and adhered to.

## 3.2 Hydrologie et hydraulique

### 3.2.1 Généralités

En plus de servir comme réservoir aux eaux et rebuts industriels, le barrage de stériles doit être conçu pour être construit et utilisé d'une façon générale à chaque jour de sa vie utile. Le concepteur doit envisager les effets du climat sur les méthodes de construction et d'exploitation. Il doit aussi veiller à ce que soient prévus des moyens de contrôler les crues de projet. La nature hautement érosive des matériaux utilisés dans le barrage de stériles entrainera comme conséquence très probable, que tout déversement en crête conduira à une rupture avec déferlement subséquent des eaux de crue, des eaux résiduelles et d'une quantité importante de stériles.

Vu qu'il existe toujours un certain bassin de drainage, dont la superficie varie entre la retenue elle-même et le bassin de drainage tout entier, le concepteur doit déterminer la quantité de ruissellement à contrôler et concevoir les moyens de contrôle. En général, l'équation fondamentale qui doit être satisfaite durant l'opération du dépôt est la suivante:

$$\text{Apport} = \text{emmagasinement} + \text{décharge}$$

L'évaluation par le concepteur des termes de cette équation doit être adéquate autant pour les opérations normales que pour les conditions extrêmes. Les apports proviennent de la précipitation directe sur la surface de la cuvette, du ruissellement sur toute partie contribuant du bassin de drainage, de la décharge de toute autre cuvette dans le bassin de drainage contribuant, des débits de base des ruisseaux et autre cours d'eau contribuant, de la percolation de l'eau dans le sol, de la récupération de l'eau de percolation, des eaux résiduelles de la mine, du procédé industriel et des boues. La surface du dépôt fournit pratiquement un emmagasinement immédiat; cependant les propriétés de surface et souterraines du bassin de drainage n'offrent qu'une capacité d'emmagasinement temporaire. L'existence d'évacuateurs et décanteurs, la ré-utilisation de l'eau de la cuvette par l'usine, l'évaporation et la percolation non récupérée font partie de la décharge. Les conditions climatiques locales, les restrictions imposées par les règlements sur la décharge de la cuvette et la nécessité pour le propriétaire de ré-utiliser l'eau du procédé, sont des facteurs déterminants sur l'importance des termes de l'équation. Les restrictions gouvernant la décharge permise de divers contaminants, le traitement de ces contaminants et les exigences du procédé ne font pas partie de cette section. Williams<sup>7</sup> présente une discussion assez détaillée traitant de l'eau du procédé.

### 3.2.2 Données de base

Les méthodes hydrologiques utilisées pour prédire l'écoulement vers la cuvette sont présentées par Chow<sup>8</sup>, Soil Conservation Service<sup>9</sup>, Bureau of Reclamation<sup>10,11</sup>, la Mine Safety and Health Administration<sup>2</sup> et le rapport British Flood Studies Report, pour ne citer que quelques unes parmi les nombreuses méthodes développées

## 3.2 Hydrology and Hydraulics.

### 3.2.1 General

In addition to the impoundment of mill water and waste, the tailings dam must be designed so that it can be constructed and operated, generally, every day of its design life. The designer must consider the effects of the normal climate on the proposed construction and operation methods and also provide a structure capable of controlling the design storm. The highly erodible nature of the materials used in tailings dam construction makes it probable that overtopping will result in failure with the subsequent release of accumulated storm water, process water, and a substantial quantity of tailings. Since some catchment area, ranging from the pond area itself to the entire drainage basin, will always exist, the designer must determine the quantity of runoff to be controlled and design a means of control. In general, the basic hydrologic and hydraulic equation which must be satisfied during operation of the impoundment is:

$$\text{INFLOW} = \text{STORAGE} + \text{OUTFLOW}$$

The designer's assessment of the elements of these categories must be adequate both for normal day to day operation and for extreme conditions. Elements of the inflow category are due to direct precipitation onto the pond area and runoff from any contributing drainage area, outflow from any other ponds in the contributing drainage area, base flow from contributing streams, ground water seepage, seepage recovery, mine water disposal, and mill water and slurry. The impoundment area will provide most immediate storage capacity; however, the surface and underground properties of the contributing drainage area will provide some temporary storage capacity. The existence of decants and spillways, re-use of pond water by the mill, evaporation, and unrecovered seepage account for outflow. Local climatic conditions, regulatory restrictions on the discharge of pond water, and the owner's need to recycle process water are prime determinants of the magnitude of the equation categories. Regulatory restrictions on the permissible discharge of the various contaminants, treatment of contaminants, and milling requirements are beyond the scope of this section. Williams<sup>7</sup> provides a comprehensive discussion covering process water.

### 3.2.2 Input

The hydrologic methods used to predict maximum flows into the pond area are presented by Chow<sup>8</sup>, Soil Conservation Service<sup>9</sup>, Bureau of Reclamation<sup>10, 11</sup>, Mine Safety and Health Administration<sup>2</sup> and the British Flood Studies Report, to name only a few of the methods developed throughout the world. These publications, taken to-

de par le monde. Ces publications présentent dans leur ensemble un large éventail allant d'études très approfondies à des méthodes normalisées.

Les autorités de la météo locale doivent être consultées pour l'obtention des données météorologiques régionales et des données spécifiques d'une zone particulière.

En plus de faire le bilan des apports vers la cuvette et des exigences de l'usine, le concepteur doit définir une crue de projet pour fins de laminage. De nombreux pays ont mis au point des exigences réglementaires dans le cadre de différentes lois; le concepteur doit donc être familier avec les lois et règlements s'appliquant à un site spécifique et à un type d'exploitation particulier. En plus des lois s'appliquant spécifiquement à un site donné, d'autres règlements peuvent influencer la conception. L'envergure et les dangers potentiels inhérents à un site peuvent exiger que des averses de très grande importance soient passées en toute sécurité. À titre d'exemple, les tables qui suivent, recommandées par le Corps of Engineers<sup>12</sup> et la Mine Safety and Health Administration<sup>2</sup> sont suggérées comme normes minimales.

#### 3.2.2.1 Envergure

La classification en terme d'envergure, basée sur la hauteur du barrage et la capacité d'emmagasinement, doit être en conformité avec la Table 1. La hauteur d'un barrage est établie en fonction du potentiel maximum d'emmagasinement, mesuré depuis le lit naturel du cours d'eau au pied aval du barrage. Si ce dernier n'est pas en travers d'un cours d'eau, la hauteur est établie à partir de la côte la plus basse de la limite extérieure du barrage jusqu'à la cote d'emmagasinement des plus hautes eaux. Pour déterminer l'envergure d'un projet, la cote maximale d'emmagasinement doit être considérée égale à la cote de crête du barrage. La classification quant à l'envergure sera déterminée soit par l'emmagasinement soit par la hauteur, selon la catégorie la plus importante indiquée par l'un ou l'autre de ces paramètres<sup>12</sup>.

Table 3-1 - Classement quant à l'envergure  
(US Army Corps of Engineers)

<u>Catégorie</u>	<u>Emmagasinement, Acres-pieds</u>	<u>Hauteur, pieds</u>
Petit	1000 et 50 (1 233 482 m <sup>3</sup> et 61 674 m <sup>3</sup> )	40 et 25 (12,19 m et 7,62 m)
Moyen	1000 et 50,000 (1 233 482 m <sup>3</sup> et 61 674 902 m <sup>3</sup> )	40 et 100 (12,19 m et 30,48 m)
Grand	50,000 (61 674 092 m <sup>3</sup> )	100 (30,48 m)

#### 3.2.2.2 Danger potentiel

La classification quant aux dangers potentiels doit être en conformité avec la Table 3-2. Les dangers ont trait aux pertes éven-



gether, present a full range from very detailed in-depth studies to standardized methods. Local meteorological officers should be approached for weather information and for data from a specific area.

In addition to balancing pond inflow with the plant requirements, the designer must provide for routing a design storm through the impoundment area. Many countries have regulatory requirements based on different laws and the designer should be familiar with the regulations governing the specific site location and type of operation. In addition to specific laws for the site, other regulations may affect the design. The size and hazard potential of the site may demand that storms of very large magnitude be passed with safety. As an example, the following tables recommended by the U.S. Army Corps of Engineers<sup>12</sup> and the Mine Safety and Health Administration<sup>2</sup> are suggested as minimum standards.

#### 3.2.2.1 Size

The classification for size based on the height of a dam and storage capacity should be in accordance with Table 3-1. The height of the dam is established with respect to the maximum storage potential measured from the natural bed of the stream or watercourse at the downstream toe of the barrier, or if it is not across a stream or watercourse, the height from the lowest elevation of the outside limit of the barrier, to the maximum water storage elevation. For the purpose of determining project size, the maximum storage elevation may be considered equal to the top of dam elevation. Size classification may be determined by either storage or height, whichever gives the larger size category.<sup>12</sup>

Table 3-1 - Size Classification  
(U.S. Army Corps of Engineers)

Category	Impoundment	
	Storage Ac-Ft	Height (Ft)
Small	1,000 and 50 (1,233,482 m <sup>3</sup> and 61,674 m <sup>3</sup> )	40 and 25 (12.19 m and 7.62 m)
Intermediate	1,000 and 50,000 (1,233,482 m <sup>3</sup> and 61,674 m <sup>3</sup> )	40 and 100 (12.19 m and 30.48 m)
Large	50,000 (61,674.092 m <sup>3</sup> )	100 (30.48 m)

#### 3.2.2.2 Hazard Potential

The classification for potential hazards should be in accordance with Table 3-2. The hazards pertain to potential loss of human

tuelles de vies humaines ou aux dommages à la propriété dans les zones à l'aval du barrage dans l'éventualité d'une rupture ou d'une fausse manoeuvre sur le barrage ou les installations attenantes. Les barrages qui se conforment aux critères correspondant à de faibles dangers sont généralement situés dans des zones rurales où la rupture peut causer des dommages à des bâtiments agricoles, aux terres agricoles, et aux routes vicinales et régionales. Les structures de la catégorie sujette à des dangers significatifs sont situées en prédominance dans des zones rurales ou agricoles où toute rupture peut causer des dommages à des maisons isolées, à des routes et chemins de fer secondaires ou causer l'interruption de l'usage ou entretien de services publics relativement importants. Les barrages dans la catégorie de grand danger potentiel sont situés à des endroits où toute rupture peut causer des dommages sérieux à des maisons, aux infrastructures agricoles, industrielles ou commerciales, ainsi qu'aux services publics, aux routes principales et aux chemins de fer<sup>12</sup>.

Table 3-2 - Classification quant au danger potentiel  
(US Army Corps of Engineers)

<u>Catégorie</u>	<u>Pertes de vie</u> (Aménagement)	<u>Pertes économiques</u> (Aménagement)
Faible	Aucune prévue (aucune structure permanente pour habitation humaine)	Minimes (aucun aménagement ou occasionnellement structures ou agriculture)
Significatifs	Peu nombreuses, (aucun aménagement urbain et seulement quelques habitations)	Notables (agriculture, industries ou structures)
Elevés	Nombreuses	Importantes (communauté, industrie ou agriculture développées)

### 3.2.2.3 Données de conception

Dans le cadre de l'évaluation de la sécurité des ouvrages, les hypothèses initiales de conception tant hydrologiques qu'hydrauliques obtenues à partir des données du projet doivent être évaluées pour déterminer leur validité. Toutes les contraintes sur le contrôle de l'eau, telles qu'entrées obturées, restrictions sur le fonctionnement des évacuateurs de crues et vannes de vidange, dissipateurs d'énergie inadéquats ou conditions de canaux restrictives, réduction importante de la capacité des réservoirs par le dépôt de sédiments et autres facteurs, doivent être considérées dans la validation des courbes de débits, de la capacité d'emmagasinage, des hydrographes, des laminages et des consignes de réglage. La capacité de décharge et/ou la capacité d'emmagasinage doivent permettre le passage avec sécurité de la crue de projet, associée à l'envergure et au niveau de danger potentiel tel qu'indiqué à la Table 3-3.

life or property damage in the area downstream of the dam in event of failure or misoperation of the dam or appurtenant facilities. Dams conforming to criteria for the low hazard potential category generally will be located in rural or agricultural areas where failure may damage farm buildings, limited agricultural land, or township and country roads.

Structures in the significant hazard potential category will be those located in predominantly rural or agricultural areas where failure may damage isolated homes, secondary highways or minor railroads, or cause interruption of use or service of relatively important public utilities. Dams in the high hazard potential category will be those located where failure may cause serious damage to homes, extensive agricultural, industrial and commercial facilities, important public utilities, main highways or railroads.<sup>12</sup>

Table 3-2 - Hazard Potential Classification

<u>Category</u>	<u>Loss of Life (Extent of Development)</u>	<u>Economic Loss (Extent of Development)</u>
Low	None expected (no permanent structures for human habitation)	Minimal (undeveloped to occasional structures or agriculture)
Significant	Few (no urban developments and no more than a small number of inhabitable structures)	Appreciable (notable agriculture, industry or structures)
High	More than few	Excessive (extensive community, industry or agriculture)

### 3.2.2.3 Design Data

In evaluating the safety of the dam, original hydraulic and hydrologic design assumptions obtained from the project records should be assessed to determine their acceptability. All constraints on water control such as blocked entrances, restrictions on operation of spillway and outlet gates, inadequate energy dissipators or restrictive channel conditions, significant reduction in reservoir capacity by sediment deposits and other factors should be considered in evaluating the validity of discharge ratings, storage capacity, hydrographs, routings and regulation plan. The discharge capacity and/or storage capacity should be capable of safely handling the spillway design flood for the size and hazard potential classification of the dam as indicated in Table 3-3.

Les calculs hydrauliques et hydrologiques aux fins de conception obtenus à partir des données du projet seront réputés acceptables si des techniques conventionnelles similaires aux méthodes décrites au paragraphe 3.3 ont été utilisées pour obtenir les données. Lorsque la crue de projet utilisée dépasse le niveau de crue recommandé par la Table 3-3, la crue de projet sera acceptable pour l'évaluation de la sécurité du barrage.<sup>12</sup>

Table 3-3 Directives d'évaluation hydrologiques  
Crues de projet recommandées pour l'évacuateur de crues

<u>Danger</u>	<u>Envergure</u>	<u>Crue de projet*</u>
Faible	Petit	Période de retour (PR): 50 à 100 ans
	Intermédiaire	Période de retour de 100 ans, allant jusqu'à la $\frac{1}{2}$ crue maximum probable (CMP)
	Grand	$\frac{1}{2}$ (CMP) à (CMP)
Significatif	Petit	PR 100 ans à $\frac{1}{2}$ (CMP)
	Intermédiaire	$\frac{1}{2}$ (CMP) à (CMP)
	Grand	(CMP)
Elevé	Petit	$\frac{1}{2}$ (CMP) à (CMP)
	Intermédiaire	(CMP)
	Grand	(CMP)

\*Les crues de projet recommandées dans cette colonne représentent l'importance de la crue de projet de l'évacuateur de crues, laquelle doit représenter la plus grande crue devant être considérée dans l'étude d'un projet donné, qu'un évacuateur soit prévu ou non. En d'autres mots, un projet donné doit permettre de passer en toute sécurité la crue de projet appropriée. Lorsqu'une marge de variations de cette crue est indiquée, on devra choisir l'envergure de crue la plus compatible avec le risque impliqué.

100 ans Intervalle de dépassement (période de retour) de 100 ans. La crue devant être dépassée en moyenne une fois tous les 100 ans; elle peut aussi être exprimée en fréquence de dépassement avec une possibilité de 1% d'être dépassée une année quelconque.

CMP Crue maximum probable. La crue pouvant être estimée en se basant sur la combinaison la plus sévère des conditions météorologiques et hydrauliques critiques pouvant raisonnablement se produire dans la région. La CMP est calculée à partir d'une précipitation maximum probable (PMP), dont les données sont généralement disponibles aux services de météorologie nationaux. Des facteurs de réduction de la précipitation probable (PMP) peuvent être appliqués étant donné que les isohyètes de précipitations ne tiennent probablement pas compte de la forme exacte du bassin de drainage; d'autre part, l'averse de projet ne se concentre probablement pas exactement sur le bassin de drainage. Parfois, la topographie locale affectera les valeurs généralisées de la PMP. Par conséquent il peut

The hydraulic and hydrologic determinations for design as obtained from project records will be acceptable if conventional techniques similar to the procedures outlined in paragraph 3.3 were used in obtaining the data. When the project design flood actually used exceeds the recommended spillway design flood, from Table 3-3, the project design flood will be acceptable in evaluating the safety of the dam.<sup>12</sup>

Table 3-3 - Hydrologic Evaluation Guidelines  
RECOMMENDED SPILLWAY DESIGN FLOODS

<u>Hazard</u>	<u>Size</u>	<u>*Spillway Design Flood (SDF)</u>
Low	Small	50 to 100-yr return period
	Intermediate	100-yr to 1/2 PMF
	Large	1/2 PMF to PMF
Significant	Small	100-yr to 1/2 PMF
	Intermediate	1/2 PMF to PMF
	Large	PMF
High	Small	1/2 PMF to PMF
	Intermediate	PMF
	Large	PMF

\*The recommended design floods in this column represent the magnitude of the spillway design flood (SDF), which is intended to represent the largest flood that need be considered in the evaluation of a given project, regardless of whether a spillway is provided; i.e., a given project should have structures capable of safely passing the appropriate SDF. Where a range of SDF is indicated, the magnitude that most closely relates to the risk involved should be selected.

100-yr = 100-Year Exceedance Interval. The flood magnitude expected to be exceeded on the average of once in 100 years. It may also be expressed as an exceedance frequency with a one per cent chance of being exceeded in any given year.

PMF = Probable Maximum Flood. The flood that may be expected from the most severe combination of critical meteorologic and hydrologic conditions that are reasonably possible in the region. The PMF is derived from probable maximum precipitation (PMP); this information is generally available from the national weather service. Reductions to the PMP may be applied because rainfall isohyets are unlikely to conform to the exact shape of the drainage basin and/or the storm is not likely to centre exactly over the drainage basin. In some cases local topography will cause changes from the generalized PMP values; therefore, it may be advisable to contact local construction agencies to obtain the prevailing practice in specific areas.

être avantageux de consulter les autorités locales du secteur de la construction, afin de connaître la pratique courante dans des zones spécifiques.

Table 3-4 Critères minimaux pour l'averse de projet recommandés pour les retenues de stériles à long terme

A. Classification selon la retenue

Catégorie	Volume maximum d'eau emmagasinée pendant une averse (Acres-pieds)		Profondeur d'eau maximale pendant l'averse de projet (pieds)
Petite	50 (61 674 m <sup>3</sup> )	et	20 (6,10 m)
Moyenne	50 et 1000 (61 674 m <sup>3</sup> et 1 233 482 m <sup>3</sup> )	ou	20 et 40 (6,1 m et 12,19 m)
Grande	1000 (1 233 482 m <sup>3</sup> )	ou	40 (12,19 m)

B. Classification quant au danger potentiel<sup>2</sup>

<u>Catégorie</u>	<u>Description</u>
a. Danger potentiel faible	Installations rurales et agricoles où toute rupture ne causerait que de faibles dommages, par exemple à des bâtiments agricoles, à la forêt, aux terres agricoles ou routes de campagne.
b. Danger potentiel modéré	Installations dans des zones surtout rurales où toute rupture peut causer des dommages à des maisons isolées, routes principales, ou chemins de fer secondaires, interrompant les services publics ou des installations d'importance relative.
c. Danger potentiel élevé	Installations où toute rupture causera des pertes de vie, des dommages sérieux à des maisons, bâtiments industriels et commerciaux, services publics importants, autoroutes et chemins de fer.

Table 3-4 - Recommended Minimum Design Storm Criteria for Long-Term Refuse Disposal Impoundments<sup>7</sup>

A. Impoundment Size Classification

Category	Maximum Volume of Stored Water During Storm (Ac-ft)		Maximum Depth of Water During Design Storm (Ft)
Small	50 (61,674 m <sup>3</sup> )	and	20 (6.10 m)
Intermediate	50 and 1,000 (61,674 m <sup>3</sup> and 1,233,482 m <sup>3</sup> )	or	20 and 40 (6.10 m and 12.19 m)
Large	1,000 (1,233,482 m <sup>3</sup> )	or	40

B. Hazard Potential Classification<sup>2</sup>

CATEGORY	DESCRIPTION
a. Low Hazard Potential	Facilities in rural or agricultural areas where failure would cause only slight damage, such as to farm buildings, forest, agricultural land or minor roads.
b. Moderate Hazard Potential	Facilities in predominantly rural areas where failure may damage isolated homes, main highways or minor railroads, disrupting services, or relatively important facilities <sup>6</sup>
c. High Hazard Potential	Facilities where a failure could reasonably be expected to cause loss of life, serious damage to houses, industrial and commercial buildings, important utilities, highways and railroads.

C. Averse de projet recommandée pour des conditions à long terme

Retenue	Danger potentiel	Averse minimale basée sur la précipitation	Critère additionnel
Petite	a. Faible	PCP*	L'averse indiquée n'est appropriée que si la combinaison des évacuateurs et décanteurs pour l'exploitation en question peuvent évacuer 90% du volume maximum de l'eau d'averse emmagasinée en 10 jours.
	b. Modéré	1/2 PMP*	
	c. Élevé	PMP	
Moyenne	a. Faible	PCP	
	b. Modéré	1/2 PMP	
	c. Élevé	PMP	
Grande	a. Faible	1/2 PMP	
	b. Modéré	PMP	
	c. Élevé	PMP	

- \* PCP - précipitation de conception probable  
PMP - précipitation maximale probable

Il est à noter que les volumes maximaux dans les retenues incluent les stériles emmagasinés, les boues et sédiments, ainsi que les eaux d'averse. Des éclaircissements supplémentaires sur les normes MSHA s'avèrent nécessaires à cause de la grande variété de configuration des barrages de stériles. Des averses générales d'une durée de 6 heures et l'averse d'orage d'une durée de 1 heure utilisées pour établir les débits de pointe, sont inadéquates pour établir les volumes totaux à envisager, dû à des averses antérieures, à la fonte des neiges ou à des averses d'une plus grande durée. D'une façon générale,

- 1) Lorsqu'il n'y a pas d'ouvrage de décantation et que l'opérateur peut passer les débits sans restrictions, la cuvette est supposée pleine et un évacuateur ayant la capacité de décharger le débit de pointe spécifié par la table, est nécessaire.
- 2) Lorsque les systèmes de décantation ont une capacité adéquate pour stabiliser la cote de la cuvette à un niveau inférieur à la crête et pour passer le débit calculé se produisant après 6 heures d'averse prolongée, le volume disponible entre l'entrée du décanteur et la crête moins la revanche peut être utilisé pour emmagasiner l'averse pourvu que 90% du volume puisse être évacué en 10 jours. Un évacuateur auxiliaire peut être utilisé pour passer une partie du débit de pointe.
- 3) Lorsque d'autres restrictions de débit s'appliquent et que l'on a établi un volume d'averse satisfaisant ces restrictions, un évacuateur et/ou un système de décantation est requis pour passer l'averse indiquée de façon à satisfaire aux conditions a) et b) ci-dessus en utilisant la cote maximale permise de la cuvette de contrôle comme cote d'origine pour le laminage de l'averse.



C. Recommended Design Storm for Long-Term Conditions<sup>7</sup>

IMPOUNDMENT SIZE	HAZARD POTENTIAL	MINIMUM DESIGN STORM BASED ON PRECIPITATION	ADDITIONAL CRITERION
Small	a. Low b. Moderate c. High	DPP 1/2 PMP PMP	The indicated storm is appropriate only if the combination of spillways and decants for the facility can evacuate 90% of the maximum volume of stored storm water within 10 days.
Intermediate	a. Low b. Moderate c. High	DPP 1/2 PMP PMP	
Large	a. Low b. Moderate c. High	1/2 PMP PMP PMP	

It should be noted that the maximum volumes under impoundment size include stored tailings, slimes, and sediments in addition to water under the design storm condition. Further clarification of the MSHA standards is necessary because of the wide variety of tailing dam configurations. General storms of six-hour duration and the thunderstorms of one-hour duration are used to establish peak flows but are inadequate to establish total volumes which may have to be handled due to antecedent storms, snow melt, or general storms of longer duration. In general,

- (a) Where no decants exist and the operator can discharge without restriction, the pond is assumed full and a spillway capable of discharging the peak flow established by the tabulated storm is required.
- (b) Where decant systems having adequate capacity to fix the pond elevation at a lower level than the crest and also carry the calculated flow which will exist after six hours of an extended general storm, the volume available between the decant inlet and the crest elevation, minus freeboard can be used to store the storm provided 90 per cent of the volume can be evacuated within ten days. A smaller spillway can be used to carry part of the peak flow.
- (c) Where other regulatory restrictions on discharge exist and a storm volume to satisfy the discharge restriction has been established, a spillway and/or decant system will be required to pass the tabulated storm in a way that will satisfy conditions (a) or (b), above, using the maximum allowable elevation of the discharge-regulated pool as the starting elevation of the tabulated storm routing.

### 3.2.3 Emmagasinement

La quantité d'emmagasinement disponible dépend de la configuration du site, de la cote de la cuvette à son niveau normal d'opération ou au niveau atteint par les stériles, et de tout autre facteur exigeant une revanche minimale entre la cote maximale de la cuvette prévue durant l'averse de projet et la cote minimale de la crête.

Une revanche minimale est nécessaire comme protection contre les vagues, et contre la possibilité d'averses s'écartant tant soit peu des prévisions, contre le tassement éventuel du barrage ou tout mauvais fonctionnement des ouvrages d'évacuation. Le Bureau of Reclamation<sup>5</sup> présente une discussion et des informations sur l'usage des longueurs de retenue et des vitesses de vent pour établir les valeurs minimales de revanche.

### 3.2.4 Décharge

En conditions normales d'exploitation, la décharge due à la percolation, l'évaporation, la récupération de l'eau du procédé ou l'usage des systèmes de décantation en déversements libres représente une partie importante dans le bilan de la cuvette. La percolation, l'évaporation et la récupération de l'eau sont sans importance pendant les opérations de laminage d'une averse. Des systèmes hydrauliques ayant la capacité de contrôler les apports d'une averse de projet sont nécessaires pour laminier l'averse par la retenue. La MSHA<sup>2</sup>, le Bureau of Reclamation<sup>11</sup>, Chow<sup>8,13</sup> et Brater and King<sup>14</sup> présentent tous des méthodes de laminage dans les retenues et de conception des évacuateurs de crues, des systèmes de décantation et d'autres ouvrages d'évacuation.

Le concepteur doit tenir compte de la nécessité de collets anti-flottaison, de culées, de collets anti-percolation, de joints d'articulation, ainsi que d'une protection des joints contre la pression de l'eau lorsqu'un conduit est utilisé comme partie du système d'évacuation. Les entrées vers les systèmes de conduits doivent être équipées de grilles de protection contre des obturations accidentelles. Les évacuateurs de crues doivent être conçus de façon à éviter l'érosion aux vitesses prévues.

## 3.3 Concept

### 3.3.1 Généralités

Bien des choses peuvent être modifiées en notre monde. Il en est d'autres qui sont immuables, telles l'emplacement d'un gisement de minerai. Néanmoins, une marge de choix subsiste quant à l'emplacement du puits ou la méthode d'exploitation d'une mine à ciel ouvert. Ces choix imposent à leur tour l'emplacement du concentrateur, lequel est probablement dicté par le gisement de minerai plutôt que par la zone de dépôt des stériles. La disposition des stériles occupe actuellement une place bien plus importante dans le plan général d'exploitation d'une mine que dans le passé, du fait des tonnages plus élevés en cause, des contraintes écologiques, des lois et des réglementations.

### 3.2.3 Storage

The amount of storage available is controlled by the site configuration, the elevation of the normal operating pool or tailing levels, and any requirements for minimum freeboard between the maximum pool elevation expected during the design storm and the minimum crest elevation.

A minimum freeboard is provided for protection against wave action, the possibility of slightly different storm conditions from those expected, possible settlement of the dam, or some malfunction of the outlet works. Bureau of Reclamation<sup>5</sup> provides a discussion together with information on the use of impoundment length and wind velocities to establish minimum freeboard values.

### 3.2.4 Outflow

During normal operations outflow due to seepage, evaporation, recovery of process water, or the use of decant systems for free discharge represent a substantial proportion of the pond water balance. Seepage, evaporation and water recovery are insignificant during storm routing operations. Hydraulic systems capable of controlling the inflow from the design storm are needed to route the storm through the impoundment. MSHA<sup>2</sup>, Bureau of Reclamation<sup>11</sup>, Chow<sup>8,13</sup>, and Brater and King<sup>14</sup> all provide methods of reservoir routing and design of spillways, decants, and other outlet works. The designer should consider the need for anti-flotation collars, thrust blocks, anti-seepage collars, articulating joints, and joint protection against internal water pressure whenever pipe is used as part of the outlet system. Inlets to pipe systems should be equipped with trashracks to provide against accidental blockage. Spillways should be designed to avoid erosion under the expected velocities.

## 3.3 Conceptual Design

### 3.3.1 General

Sometimes we can change things in this world, but one of the unchangeables is the location of an ore body. However, there may be some choice in where the shaft will be located or how the open pit will be mined, which dictates where the mill or concentrator will be located; yet its location is probably more controlled by the ore body than by the tailings disposal area. Tailing disposal looms much larger in the overall mining plan than in the past because of larger tonnages, environmental restraints, laws and regulations.

Si le choix entre divers sites favorables à la disposition de stériles est possible, le premier point à considérer est l'équilibre entre les coûts d'investissement et d'exploitation d'une part, et le prix de revient d'une exploitation facile, sécuritaire et efficace d'autre part, ainsi qu'un étalement du coût des investissements dans une construction par étapes. Le type de sol de fondation et l'étendue du terrain relativement au tonnage total à miner de même qu'un site possible à l'aval du concentrateur suivent en ordre d'importance. Si un site de dépôt de stériles n'est pas visible depuis des routes principales ou peut être dissimulé par des arbres, il doit être retenu de préférence.

La protection de l'environnement contre le ruissellement, la percolation, les poussières, de même qu'un dépôt esthétiquement acceptable sont des considérations dont on peut tenir compte généralement dans n'importe quel site.

En des régions situées près de centres de population, les sites favorables aux dépôts nécessitent souvent leur récupération à d'autres usages plutôt qu'un simple retour à l'état naturel initial. Ceci n'est pas toujours compatible avec la stabilité des remblais, laquelle doit être prioritaire.

Du fait que chaque mine possède ses propres particularités, l'ingénieur concepteur doit être assez innovateur pour profiter du terrain, des matériaux à mettre en dépôt, du volume, des matériaux de décapage (mine à ciel ouvert), du sol de surface, etc., pour obtenir l'exploitation la meilleure et la plus rentable. Il doit aussi viser à l'équilibre entre les investissements et l'exploitation pour en arriver à obtenir la meilleure exploitation aux moindres coûts.

### 3.3.2 Tonnages

Le choix d'un site pour la mise en dépôt de stériles d'une nouvelle exploitation est plus critique que des choix futurs parce que la superficie initiale doit suffire à la totalité des stériles sans occasionner des retards d'excavation ou de concassage (milling). Par conséquent, une mine à grande production exige deux aires pouvant être utilisées alternativement à moins que les conditions ou méthodes locales en dictent autrement. Les sites pour utilisation ultérieure doivent être préparés bien à l'avance dès l'acceptation du tonnage maximum; mais il faut toujours prévoir une aire en cas d'urgence.

Le tonnage quotidien, le tonnage annuel, les augmentations escomptées de tonnage, leur progression, et le tonnage annuel maximum à mettre en dépôt doivent être connus. Si une partie du gros sable doit être utilisée comme remblai de base (underground fill), cette partie influencera la conception parce qu'une quantité moindre de sable sera disponible pour la construction des remblais et une quantité totale moindre devra être mise en dépôt.

Si une partie importante est utilisée comme matériau de base ou si la mouture est extrêmement fine, cela peut rendre la construction des bermes avec du sable plus difficile ou impossible. La néces-

If there is a choice of several good sites for tailing disposal, the first consideration is to balance the cost between capital and operating cost with the balance in favour of easy, safe and best operation, plus more favourable opportunities to spread capital cost in time, by staged development. The soil type in the foundation and the size of the area in relation to the daily total tonnage to be mined, and a site downstream from the concentrator are of next importance. If a tailing site cannot be seen from main travelled roads, or can be hidden by trees, it should be preferred to a site not so hidden.

Protecting the environment from run-off, seepage and dust, and making the impoundment aesthetically acceptable, can generally be designed into nearly any site. In areas near population centres, disposal sites often need to be reclaimed for use other than return to the former natural state. This may not always be compatible with embankment stability, which must have priority.

Because each mine is site specific, the design engineer needs to be innovative to take every advantage of the terrain, the material to be impounded, volume, stripping waste (open pit), surface soil, and any other factors to get the most efficient and best operation. He must also strike a balance between capital and operating cost to get the best operation at the least cost.

### 3.3.2 Tonnages Involved

Selecting a site for tailing disposal for a new operation is more critical than later selections because the initial area must dispose of all tailings without delaying mining or milling. Therefore, a large tonnage mine needs two areas that can be used alternately unless local conditions or methods dictate otherwise. Later impoundments should be prepared well in advance of the time for accepting the entire tonnage, but at all times there must be a backup area for emergencies.

The daily tonnage, annual tonnage, expected increases in tonnage, gradation, and annual maximum tonnage to be impounded must be known. If a portion of the coarse sand is to be used for underground fill, it will affect the design because less of the sand will be available for dam building and less total sand will have to be impounded. If a large portion is used underground or the grind is extremely fine, it may make berm building with sand more difficult or impossible. Use of sand for underground fill, or a fine grind of sand, may indicate that cyclones should be used.

sité d'utiliser du sable comme matériau de base (underground fill) ou d'utiliser un matériau fin peut être une indication que des hydrocyclones doivent être utilisés.

On utilise de petites quantités de cyanure dans plusieurs circuits de broyage; cependant ces cyanures s'oxydent généralement assez vite dans la cuvette de stériles de sorte qu'ils ne constituent pas de problème même si les eaux des stériles sont épuisées (ou déchargées) à l'aval. La plus grande partie de l'eau des stériles circule en circuit fermé dans l'usine, contribuant ainsi à l'élimination du problème sauf en ce qui a trait à la percolation qui doit être considérée dans la conception.

Si possible, un site doit permettre de contenir les stériles durant la vie entière d'une mine ou être d'envergure la plus rentable compte tenu de la sécurité, de l'économie, des investissements et des coûts d'exploitation.

### 3.3.3 Choix des emplacements

Dès que l'exploration révèle une mine en puissance, on doit considérer les emplacements éventuels du concentrateur et des dépôts de stériles. Lorsque, par la suite, l'étendue du gisement de minerai devient connue, la méthode d'exploitation doit être confirmée. Que la mine soit une exploitation à ciel ouvert ou en souterrain, le tonnage journalier, l'analyse approximative au tamis, et d'autres facteurs-clés doivent être connus. L'emplacement du concentrateur doit être définitif avant la prise d'une décision finale quant à l'emplacement des dépôts de stériles.

Les recherches préliminaires doivent inclure tous les emplacements possibles, rapprochés ou éloignés de l'usine et de préférence à une cote inférieure. Les dimensions d'un emplacement relativement au tonnage journalier varient avec le terrain, selon la largeur d'une vallée en pays montagneux ou encore selon la configuration horizontale du terrain. On prévoiera néanmoins environ 17 hectares pour chaque 1000 tonnes de capacité journalière. Dans une vallée où la montée annuelle est rapide au cours des premières cinq ou dix années, une planification judicieuse permettra d'éviter la fermeture du concentrateur dû au manque de capacité de mise en dépôt. En de tels endroits deux possibilités se présentent; la première consiste à prévoir deux aires séparées, chacune servant à la disposition de stériles durant une période donnée, disons six mois, ou suffisamment longtemps pour lever les bermes, déplacer la tuyauterie, et recevoir les stériles à nouveau. C'est le cas de la méthode amont par "spigotage" (lances à robinets) sur la périphérie. La deuxième possibilité consiste à la mise en dépôt continue des stériles sans qu'il soit nécessaire d'arrêter les opérations pour permettre la construction de bermes. En ce cas, la conduite maîtresse et les hydrocyclones sont soutenus par deux conduites verticales jumellées. Des vérins hydrauliques permettent de surélever la conduite entière, chaque jour si nécessaire, tout en déchargeant du sable stérile par la méthode de construction de l'axe central (centerline method of dam building). L'emplacement ainsi que la méthode de mise en dépôt doivent être tels que l'arrêt des opérations au concentrateur ne soit pas imposé par un manque d'espace pour les stériles.

Small amounts of cyanide are used in many mill circuits, but most usually oxidize in the tailings pond fast enough so that they are no problem even if the tailings water is discharged. Most tailings water is in a closed circuit with the mill, precluding this problem except for seepage that must be considered in the design.

If possible, a site should contain the tailings for the entire life of the mine, or should be the maximum feasible size for safety and economy of capital and operating cost.

### 3.3.3 Site Selection

As soon as prospecting indicates a potential mine, concentrator and tailings sites should be considered. By the time the extent of the ore body is known, the mining method should be determined. Whether the mine will be open pit or underground, daily tonnage, approximate screen analysis, and other key factors should be known. The concentrator site should be firm before a final decision is made for the tailings site or sites.

Preliminary investigations should cover all possible sites near or far from the mill, preferably at a lower elevation. The size of the site in relation to the daily tonnage varies with the terrain and whether it is in a wide or narrow mountain valley or in an open and relatively flat plain, but a rough figure of 14.0 hectares for each 1,000 tonnes of daily capacity is required. In a mountain valley where the annual rise will be rapid for the first 5 to 10 years, careful planning is required to ensure that the tailings dam can be raised sufficiently quickly to accept all the discharged tailings. In such areas there are two possibilities. The first is to have two separate sites where each would take the entire production for a time, say 6 months or long enough to raise the berms, move the pipes, and be ready to accept tailing again. This can be used with the upstream method by spigoting around the periphery. The second possibility is continuous tailing deposition not subject to shutdown for berm building. In this situation, the header pipe and cyclones are supported between twin vertical pipes. Hydraulic jacks raise the entire line, every day if necessary, while discharging tailings sand in the centreline method of dam building. The site and impounding method must not subject the concentrator to shutting down for lack of tailings room.

Les conséquences d'une rupture doivent être évaluées lors du choix d'un emplacement. Des cartes doivent être établies montrant jusqu'où une rupture permettrait aux boues de stériles de s'étendre, de même que leur profil au long des flancs des vallées et l'indication de l'importance des populations implantées dans leur trajectoire.

L'eau de percolation provenant de la retenue de stériles devrait être restituée à l'usine de broyage dans la mesure du possible. Lorsque le rocher ou une zone imperméable existe au voisinage de la surface, une tranchée d'interception peut capter la percolation; si les alluvions sont profondes, la percolation pourra être captée par des puits profonds. Ceci pourra être vérifié par des puits témoins. Lorsque nécessaire, des usines d'épuration permettront de purifier l'eau avant sa restitution.

À titre d'exemple, la US Nuclear Regulatory Commission exige actuellement une restitution nulle depuis toute retenue nucléaire; ceci implique la nécessité d'un revêtement plastique ou en argile. En apportant des solutions apparentes au problème de la percolation vers les nappes souterraines, divers autres problèmes peuvent être créés, celui du drainage et de la stabilité, ou celui du contrôle à long terme des percolations.

L'aspect économique de la mise en dépôt des stériles est l'une des principales considérations dans le choix d'un emplacement. Les autres sont la sécurité et la facilité d'exploitation.

Pendant les saisons à températures extrêmes, le travail perd de son efficacité; la main d'oeuvre doit en conséquence être réduite au minimum. Un emplacement où l'exploitation est facile et sûre avec un minimum de travail physique journalier et où la plus grande partie du travail se limite à suivre l'eau et à veiller à l'ajustement des débits vers la retenue, constitue un atout précieux. Ceci contribue à une réduction considérable des coûts d'exploitation, peut-être au prix d'un certain accroissement des coûts d'investissement.

Le choix des emplacements fait l'objet du chapitre 1.

#### 3.3.4 Choix du type de remblai

La méthodologie de conception ainsi que les critères conduisant au choix de la coupe la plus appropriée et au meilleur remblai ont été l'objet de nombreux rapports présentés par plusieurs pays. (Voir la bibliographie.) Les principales méthodes de construction sont décrites ci-après. Le chapitre 4 présente le choix d'un remblai du point de vue de la construction et de l'exploitation.

##### 3.3.4.1 Méthode amont (Fig. 3-1)

Le type de retenue le plus fréquent est créé par la méthode amont par lances à robinets (spigotage). Ce type est employé si le sable est suffisamment bon pour la construction de barrages, si le risque sismique est faible et si les barrages sont d'une hauteur modérée. Des exceptions à la règle consistent à placer des compo-



When choosing a site, the consequences should be assessed. Inundation maps should be drawn showing how far a failure would cause the tailings slurry to flow, how high on the valley walls it would reach, and how many people live in its path.

The seepage water from the tailings pond should go back to the mill by whatever methods are available. Where an impervious zone or bedrock is close to the surface, an interceptor trench can catch the seepage, or if the alluvium is deep, interceptor wells can catch the seepage. This can be checked by monitor wells. Where necessary, water treatment plants can clean the excess water before it is released.

For instance, the US Nuclear Regulatory Commission now requires zero discharge from all nuclear tailings ponds; this means an impervious clay or plastic liner. By apparently solving the immediate problem of seepage into groundwater, several other problems are created. The first is drainage and stability and the second is long-term seepage control.

In some countries discharge and seepage from uranium tailings ponds are allowed (3, 96, 97).

The economics of tailings disposal is one of the primary considerations in choosing a site. The others are safety and ease of operations.

During seasons of extreme heat and cold, labour becomes inefficient, so on-site labor should be minimized. A site having an easy, foolproof operation with a minimum of daily physical on-site work, and where most of the work is confined to monitoring the water and adjusting the discharge into the pond, is a big asset. This reduces operating costs considerably, although there may be some increase in capital cost.

Site selection is fully covered in Chapter 1.

### 3.3.4 Selection of Type of Dam Embankment

Design methodology and criteria leading to selection of the most appropriate cross-section and type of embankment have been the subject of reports contributed by many countries. (See Bibliography). The main construction methods are described hereafter. Chapter 4 presents the selection of an embankment from a construction and operation viewpoint.

#### 3.3.4.1 Upstream Method (Fig. 3-1)

The most common tailings pond is the upstream type with spigoting. It is used if the sand is suitable for dam building, if the seismicity risk is relatively low, and if the dams will not be exceedingly high. An exception is when an extremely fine grind, not generally suitable for dam buildings, is used in

santes de mouture extrêmement fine, dans le cas de la méthode amont à l'aide d'hydrocyclones. Ceci est généralement dangereux dans une vallée étroite avec des versants raides.

Les barrages de stériles de ce type sont les plus économiques. Les structures de base, le remblai d'amorce et les ouvrages de décantation sont les plus vite construits et de ce fait les plus vite en service. C'est pourquoi ils doivent être toujours préférés, si les conditions pour leur adoption existent. Afin d'obtenir des composantes stables de recharge d'un matériau ayant des caractéristiques de cisaillement suffisantes, il est nécessaire de faire un "spigotage" convenable décentralisé, depuis le remblai d'amorce et d'entretenir de longues plages non submergées. C'est ainsi qu'une séparation naturelle du débit des stériles déposés aura lieu au long de la plage avec dépôt du sable grossier dans les zones extérieures, où les composantes de recharge sont formées. Les matériaux fins silteux et argileux sont déposés plus loin vers la cuvette. Si le matériau d'origine contient une quantité suffisante de sable et si la plage est longue, on pourra facilement constituer une recharge ayant les dimensions désirées. Un désavantage inhérent à ce type de barrages de stériles réside dans le fait que les sections de la recharge construites ultérieurement devront reposer sur du matériau granulaire plus fin, placé au cours des étapes précédentes. Ce matériau possède donc des

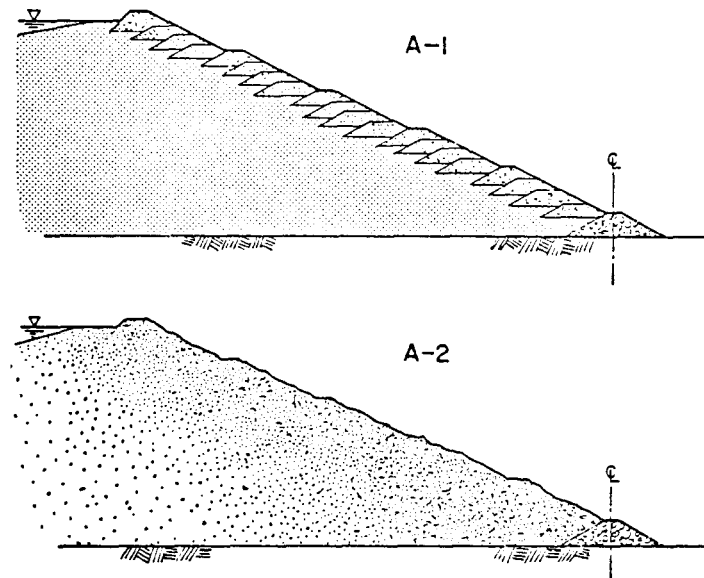


FIG. 3-1

Méthodes de construction des remblais de stériles miniers ou industriels.

- (A) Méthode de construction en amont.  
 (1) Dignes construites mécaniquement.  
 (2) Dignes construites hydrauliquement.

*Mine, mill or plant refuse embankment construction methods.*

- (A) Upstream construction method.  
 (1) Mechanically constructed dams.  
 (2) Hydraulically constructed dams.

conjunction with cyclone separation prior to deposition; in these circumstances the width of the valley would be critical to the adoption of the upstream method and a narrow valley with steep abutments could be the only possibility.

Tailings dams of this type are the most economical ones. The basic structures, the starter dam and the decant works are the fastest built and thus are the fastest in operation. That is why they are to be always preferred, if the necessary conditions for their adoption are present. In order to obtain stable supporting components from a material of sufficient shear characteristics, it is necessary to perform proper decentralised spigotting from the starter dam and to maintain long, non-submerged beaches. Thus, natural flow separation of the deposited material (tailings) takes place along the beach with coarser sand material disposed in the outer zones, where the supporting parts are formed. Finer silty and clay matter is deposited towards the decant pond.

If the original material contains a sufficient amount of sand fractions and the beach is long, a stable support of the necessary size is easily formed. A disadvantage of this type of tailings dams is that the sections of the support component constructed at later stages will lie on finer granular material, laid during the preceding stages. This material is of lower strength characteristics and consolidates slowly. Thus, the stability of this type of embankment is inversely proportional to an increase in height.

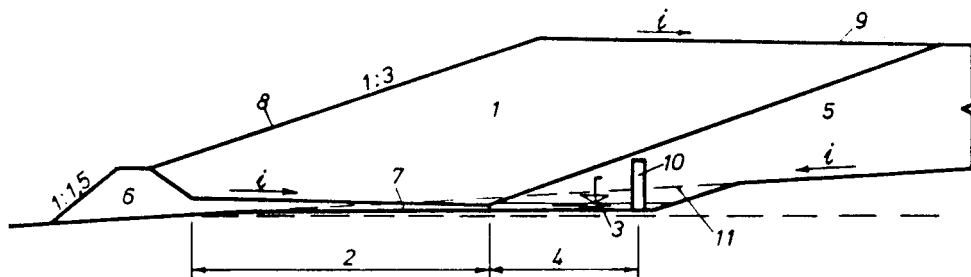


FIG. 3-2

Méthodes de construction des remblais de stériles miniers ou industriels – recharge  
 Mine, mill or plant refuse embankment construction methods – surcharge

1. Recharge = Supporting Part (shell)
2. Longueur de la zone de recharge = Length of the Supporting Part
3. Bassin de décantation = Decant Pond
4. Longueur du bassin de décantation = Length of the Decant Pond
5. Boues = Slimes
6. Remblai d'amorce = Starter Dam
7. Couche drainante = Drain Layer
8. Pente aval = Downstream Slope
9. Plage = Beach
10. Tour de décantation = Decant Tower
11. Terrain naturel (TN) = Original Ground (0,4)

caractéristiques de résistance plus faibles et ne se consolide que très lentement. La stabilité de ce type de remblai est inversement proportionnelle à la hauteur. Ceci entraîne la nécessité de limiter la hauteur de ce type de barrage de stériles.

Lorsque la fondation est inclinée, la stabilité n'est assurée qu'avec des difficultés encore plus grandes. Dans ce cas, les plages durant les étapes initiales sont plus courtes et du matériau fin se dépose près du remblai d'amorce. Au commencement, on peut même envisager un "spigotage" submergé, ce qui ne produit presque pas de stratification du matériau, dont la fraction fine, de consolidation plus lente, reste dans le voisinage du remblai d'amorce. Ceci implique pour la stabilité du barrage une hauteur sécuritaire plus faible. Les conditions régnant au site sont les critères les plus déterminants pour une décision sur la convenance de ce type de barrage de stériles<sup>15</sup>. Pour des ouvrages en travers de val, type B6, de la figure 1-1, avec une vallée étroite au remblai d'amorce, un front de "spigotage" limité et une retenue qui s'élargit progressivement, le rapport de la superficie de dépôt à la longueur du front de "spigotage" est élevé. Dans ce cas, le barrage créé par spigotage, selon la méthode amont, peut être construit même si les stériles à l'origine sont très fins (90% 0.074 mm).

Par contre, dans le cas de vallées larges avec un front de "spigotage" long et une retenue courte, ou endiguée de tous les côtés, à la manière d'un stade, (type B8 de la Fig. 1-1), aucun barrage de stériles par "spigotage" selon la méthode amont ne peut être construit, même en présence de stériles grossiers, (60% < 0.074 mm), puisque la fraction de sables n'est pas suffisante pour la formation de recharge stable au long du front de "spigotage" tout entier. La bibliographie fait état de certains rapports entre la longueur de mise en dépôt de stériles et la hauteur possible des barrages<sup>15</sup>. L'agencement présenté dans la figure 3-2 montre une possibilité de barrage de ce type avec une plus grande hauteur, sur fondations inclinées<sup>16</sup>. Si le remblai d'amorce est perméable, il pourra être prolongé au moyen d'un tapis légèrement incliné vers la cuvette. La longueur de ce tapis de drainage est choisie pour assurer une zone de recharge suffisante. Ceci a pour résultat une cuvette et des zones de matériaux fins plus éloignées du remblai d'amorce. En même temps la nappe phréatique est abaissée et draine les stériles en place, augmentant ainsi la stabilité statique et dynamique du barrage. Si le remblai d'amorce est construit avec les stériles, ce tapis aura une longueur plus grande.

Lorsque la pente du terrain dans la cuvette et au long du tapis de drainage est forte, on peut exécuter des travaux de terrassement (fig 3-2), les matériaux excavés pouvant alors être utilisés comme matériaux d'emprunt pour le remblai d'amorce. La hauteur des barrages de stériles de ce type peut aussi être augmentée, après que la hauteur critique aura été atteinte, par recharge de la pente aval, avec des matériaux d'emprunt, terre ou roc.

Après la construction d'un barrage jusqu'à une certaine hauteur et lorsque la longueur de dépôt des matériaux aura augmenté, le rapport des fractions de sable requises sur les fins devient positif

This leads to the necessity of limiting the height of this type of tailings dam.

When the foundation is inclined, stability is secured with even greater difficulty. In this case, during the initial stages the beaches are shorter, and fine material is deposited close to the starter dam. In the beginning there can even be under-water spigotting which causes almost no stratification of the material, and fine, slow-to-consolidate material remains in the proximity of the starter dam. This further reduces the height to which the tailings dam is stable. The site conditions are the most determinant criteria to decide on the suitability of this type of tailings dams<sup>15</sup>. For cross-valley type of structures B-6 from Fig. 1-1 and a narrow valley at the starter dam with a small spigotting front and a long widening reservoir, the relation of the surface of deposition to the length of the spigotting front is large. In this case the spigotted upstream tailings dam can be constructed even if the original tailings are very small (90% 0,074 mm).

Conversely, in the case of wide valleys with a long spigotting front and a short reservoir, or diked from all sides (stadium) type B-8 from Fig. 1-1 no spigotted upstream tailings dam can be built even in the presence of considerably coarse tailings (60% 0,074 mm), since the sand fractions are not sufficient for the formation of stable supporting parts along the entire spigotting front. Some relationships between the length of deposition of the tailings and the possible height of the tailings dam are given in<sup>15</sup>. Higher tailings dams of this type on an inclined foundation are possible with the scheme shown on Fig. 3-2<sup>16</sup>. If the starter dam is permeable, it may be extended by a blanket slightly inclined towards the pond. The length of this drain blanket is such as to assure a sufficient size of the supporting part. This results in the pond and zones of finer material being farther from the starter dam. At the same time it lowers the groundwater curve and drains the deposited tailings, thus increasing the static and dynamic stability of the tailings dam. If the starter dam is built of a material more impermeable than the tailings, this blanket is of a greater length. When the foundation slope is large in the pond and over the length of the drain blanket, some earthwork may be done (Fig. 3-2) and the dug out material may be used like borrow material for the starter dam. The height of tailings dams of this type may also be increased, after the critical height has been reached by overloading the downstream slope with borrow earth and rock fill.

After the tailings dam has been built to a certain height and the length over which the material is deposited has increased, the balance of the sand fractions required for stability with respect

et le sable cycloné peut être utilisé comme recharge. Habituellement cette solution est adoptée si dans une étape ultérieure la hauteur initiale du barrage de stériles doit être augmentée ou si la résistance des stériles diminue à la suite de modifications dans le procédé de broyage (milling process) ou dans les caractéristiques du minerai lui-même.

#### 3.3.4.2 Méthode de l'axe central (Fig. 3-3)

La méthode de l'axe central constitue un compromis entre les méthodes amont et aval parce que d'un point de vue sismique elle est meilleure que la méthode amont et exige bien moins de fraction grossière (underflow) que la méthode aval. Cette méthode peut utiliser une mouture plus fine que la méthode amont, mais elle peut nécessiter à l'occasion un apport supplémentaire de roc de rejet servant comme appui du côté aval et conférant ainsi à l'ensemble une stabilité plus grande. Elle peut être conçue pour une exploitation facile sans interruption du débit de stériles, pourvu que la superficie soit suffisamment grande et que les hydrocyclones produisent un sable possédant une perméabilité suffisante pour que la nappe phréatique soit maintenue bien en-dessous de la surface. Cette méthode pourrait devenir intéressante spécialement dans les cas de mines à ciel ouvert où de grandes quantités de rejets sont disponibles comme matériaux d'appui (buttress). Elle comporte bien sûr le coût additionnel des hydrocyclones et du pompage si une mise en place par gravité n'est pas possible; cependant, la main d'oeuvre devrait être inférieure à celle d'autres méthodes. L'avantage d'une opération sans interruption du débit est réel, mais il ne doit pas être invoqué comme justification d'une aire trop petite entraînant une montée annuelle trop grande. Le débit grossier des hydrocyclones "underflow" est saturé lorsque déchargé et de ce fait doit bénéficier d'un temps suffisant de drainage pour le maintien de la nappe phréatique à des niveaux suffisamment bas pour assurer la stabilité. La perméabilité du débit grossier des hydrocyclones doit être telle que l'eau ait assez de temps pour se drainer à mesure que le point de décharge est déplacé sur la face du barrage (ou remblai).

#### 3.3.4.3 Méthode aval (Fig. 3-4)

Cette méthode n'est utilisée que dans des régions extrêmement sismiques où elle serait en fait la seule pouvant assurer un remblai sûr. Elle présente quelques limitations quant à la hauteur pouvant être atteinte à cause de la grande quantité de sable nécessaire pour chaque accroissement de la hauteur. Elle est plus onéreuse du fait du matériel mécanique nécessaire pour la construction selon une pente faible du côté aval. L'opération est plus difficile en ce que l'accès à la conduite maîtresse est, d'une part interrompu par l'accumulation grossière provenant des hydrocyclones si la route d'accès est du côté aval, et d'autre part, si la conduite est à l'amont, par le débit fin (overflow). Ce n'est pas la meilleure des méthodes.

Ce type de remblai offre la stabilité la plus grande. Dans ses phases initiales, il présente le désavantage d'un rapport négatif entre les fractions plus grosses de la recharge et les fractions plus fines, c'est-à-dire que les fractions grosses appelées à com-

to the fines becomes positive and then cycloned sand can be used for the overloading. Usually this solution is adopted if at a later stage the initial height of the tailings dam has to be increased or if the strength characteristics of the tailings decrease as a result of changes in the milling process or in the characteristics of the ore itself.

#### 3.3.4.2 Centreline Method (Fig. 3-3)

The centreline method is a compromise between the upstream and downstream methods because seismically it is better than the upstream, and requires much less cyclone underflow than the downstream. It can use finer grind than the upstream method, but on occasion might need supplemental waste rock for a buttress on the downstream face for extra stability. It can be designed for easy operation with no interruption in the discharge of tailing, provided the area is large enough and the cyclones produce a sand that has sufficient permeability that the phreatic line is kept well below the surface. This could become a popular method, especially with open-pit mines where ample waste is available for the buttress. It does have the added cost of cyclones, and of pumping costs if gravity discharge is not possible; but should call for less labour than other methods. The advantage of no interruption in discharge is a real plus, but this should not be used as an excuse for having the area too small so that the annual rise is too great. The cyclone underflow is saturated when discharged and must have time to drain to keep the phreatic line low enough for stability. The permeability of the cyclone underflow must be such that water has time to drain as the cyclone underflow is moved along the face of the dam.

#### 3.3.4.3 Downstream Method (fig. 3-4)

This method would only be used in extremely sensitive seismic areas where it might be the only method that would make a safe embankment. It is somewhat limited in height because of the vast amount of sand needed for each incremental increase. It is more costly because of the mechanical equipment needed to make the flat downstream slope. The operation is more awkward because access to the header pipe is blocked off by the cyclone underflow if the access road is downstream, and blocked off by the cyclone overflow pipe if upstream. It is not one of the better operating methods.

This type of embankment offers the greatest stability. In the initial period, it has the disadvantage that the balance between the larger fractions of the supporting part and the small fractions retained by the supporting part is negative, i.e. the

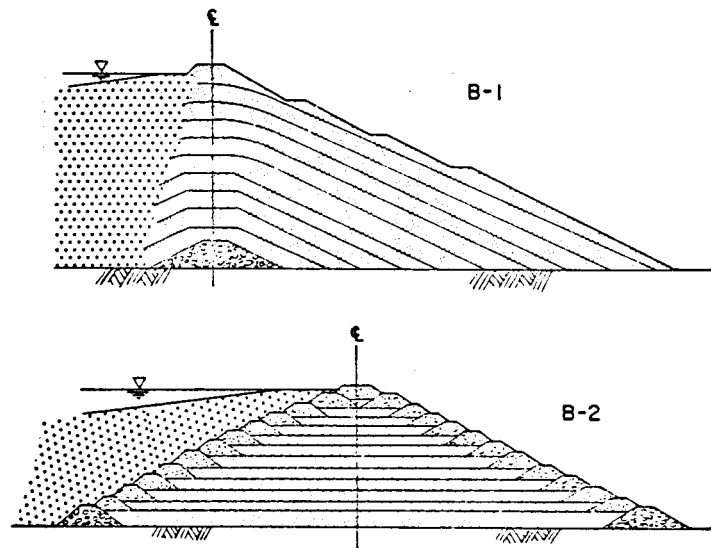


FIG. 3-3

Méthodes de construction des remblais de stériles miniers ou industriels.

(B) Méthode de construction avec axe central.

(1) Remblai appuyé.

(2) Remblai symétrique.

*Mine, mill or plant refuse embankment construction methods.*

*(B) Centerline construction method.*

*(1) Leaning embankment.*

*(2) Symmetric embankment.*

stituer la recharge sont insuffisantes. Ceci implique un barrage d'amorce plus haut pour fournir du volume pour les fractions fines.

Le barrage de stériles en travers de val, construit par la méthode aval au-delà d'une certaine hauteur, a un bilan positif en ce qui concerne les fractions grossières, vu que le volume de la retenue augmente très vite avec la hauteur. Ceci permet la prise de deux décisions pour empêcher, lorsque nécessaire, la progression des éléments grossiers, de l'hydrocyclone "underflow" en avance des boues<sup>17</sup>.

- l'augmentation du taux de séparation dans l'hydrocyclone; ceci entraîne un matériau cyclonné plus gros et une fraction fine "overflow" plus grossière, laquelle se divise mieux et aide à maintenir de plus longues plages. La cuvette s'éloigne des zones extérieures, la percolation est plus faible et la nappe phréatique est abaissée,
- l'arrêt des hydrocyclones de temps en temps et le "spigotage" de la totalité des stériles. On a ainsi la formation de couches de fractions grossières dans la zone des éléments fins cyclonnés (overflow). Les couches accélèrent le procédé de consolidation et abaissent la nappe phréatique.



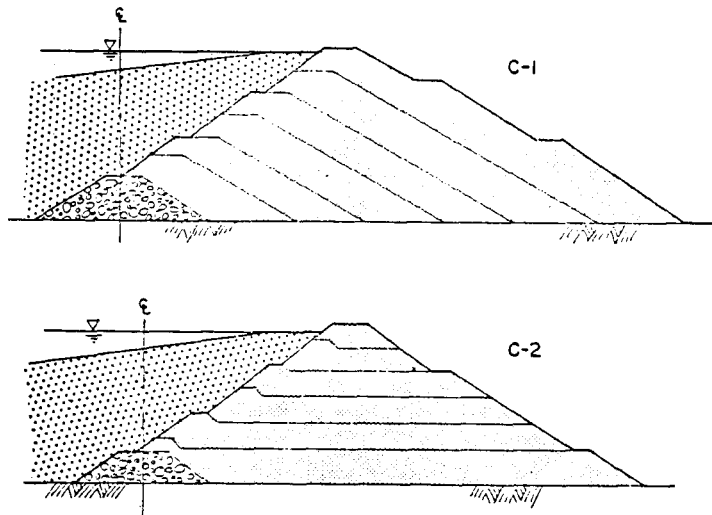


FIG. 3-4

Méthodes de construction des remblais de stériles miniers ou industriels.

(C) Méthodes de construction en aval.

(1) Méthode inclinée.

(2) Méthode horizontale.

*Mine, mill or plant refuse embankment construction methods.*

*(C) Downstream construction methods.*

*(1) Inclined method.*

*(2) Horizontal method.*

larger fractions that are to shape the supporting part are insufficient. This requires a higher starter dam to supply volume for the small fractions.

The cross-valley type tailings dams built by the downstream method has, from a certain height upwards, has a positive balance with respect to the coarser fractions, since the reservoir volume increases very fast with height. This permits two operation decisions to prevent, if required, the portion of the cyclone underflow to advance ahead of the slimes (17):

- To increase the split diameter of hydrocycloning. This will result in coarser cycloned material and coarser cyclone overflow which splits better and helps maintain longer beaches. The pond moves further away from the outer zones, seepage is weaker and the groundline curve lower.
- To discontinue the hydrocycloning from time to time, and to spigot with the total amount of tailings. Layers of coarser fractions are formed in the part consisting of the cyclone overflow. These layers accelerate the process of consolidation and lower the groundwater curve.

Ces deux solutions produisent un effet favorable, la plage devient plus vaste, la consolidation est accélérée, la nappe phréatique abaissée et la résistance au cisaillement dans la zone interstitielle près de la zone cyclonée est augmentée. Il en résulte que la stabilité statique et dynamique est augmentée.

Si la longueur de la plage à l'étape finale est grande, la fraction de sable est suffisante pour permettre aux matériaux plus gros de se déposer dans la recharge par "spigotage" sans cyclones, entraînant d'importantes économies. Le meilleur moment pour passer du cyclonage au "spigotage" normal peut être déterminé en soumettant à l'essai les matériaux déposés pendant le "spigotage" périodique sans hydrocyclones.

#### 3.3.4.4 Barrage de type conventionnel, à matériaux d'emprunt

On utilise ce type lorsque :

- a) les stériles sont fins;
- b) la cadence de montée du niveau des stériles est excessive relativement au temps de remplissage de chaque étape successive, dans n'importe laquelle des méthodes de construction précédentes (3.3.4.1 à 3.3.4.3); ou
- c) on a affaire à d'autres facteurs.

Les types à matériaux d'emprunt peuvent être zonés (Fig.3-5), homogènes ou homogènes modifiés (par exemple, avec un filtre de drainage). Un barrage construit à l'avance est plus sécuritaire et convient mieux, bien qu'habituellement plus cher qu'un barrage construit et exploité concurremment.

#### 3.3.5 Systèmes de transport des boues

##### 3.3.5.1 Écoulement par gravité

L'idéal est d'obtenir un débit par gravité depuis les épaisseurs (mill thickeners) jusqu'à la retenue durant la vie entière de cette dernière évitant ainsi coûts et problèmes de pompage. La pente de la conduite sera différente pour une mouture grossière avec de 48% à 50% de solides. Ceci doit être établi pour chaque mine. Une pente approximative pourrait être de 0,5 m pour 100 m. Des points d'ajustement (drop boxes) sont employés en général pour obvier aux pentes excessives dépassant 0,5%; ces points sont contournés pour maintenir les pressions adéquates vers les robinets ou hydrocyclones au-fur-et-à-mesure que le niveau monte dans la retenue. La vitesse est importante pour empêcher une usure excessive lorsque la ligne est trop haute ou pour empêcher l'obturation si la ligne est trop basse. La vitesse de débit doit être entre 1,2 et 1,8 m/s pour les stériles non ferreux et atteindre 3,6 à 4,2 m/s pour la taconite.

##### 3.3.5.2 Pompage

Dans les cas de pompage de boues de stériles, la vitesse doit être la même que pour un débit par gravité. Le tonnage, le matériau et la pression totale sont à la base du choix de la pompe appropriée.

Both solutions produce a favourable effect, the beach expands, consolidation is accelerated, the ground water curve is lowered and the shear strength of the interstitial zone, near the cycloned part, is increased. As a result, the static and dynamic stability becomes greater.

If the beach length in the final stage is great, the sand fraction is sufficient to permit coarser material to be deposited in the supporting part, by spigotting without cyclones, with substantial economy. The moment suitable for switching from cycloning to normal spigotting can be determined by testing the deposited material during the periodic spigotting without cyclones.

#### 3.3.4.4 Borrow Material, Water Retaining Type Dam

Borrow types are adopted when:

- a) tailings are of fine grind;
- b) the rate of rise of the tailings level is excessive with respect to the filling time of each successive stage in any of the previous construction methods 3.3.4.1 through 3.3.4.3; or
- c) for other practical reasons.

Borrow types may be zoned (Fig. 3-5) homogeneous or modified homogeneous (for instance, with a filter drain).

A preconstructed dam is safer and more convenient but usually more expensive than coincidentally built and operated impoundments.

#### 3.3.5 Slurry Transport System

##### 3.3.5.1 Gravity Flow

To avoid costs and problems of pumping, the ideal situation is to have gravity flow from the mill thickeners to the tailing pond for the entire life of the pond. The grade for the line will differ for a coarse grind at 48 to 50 per cent solids. This must be determined for each mine. A rough figure is 0.5 feet per 100 feet. Drop boxes are generally employed to take care of excess grade above 0.5 percent, and these drop boxes are by-passed to keep the proper pressure to the spigots or cyclone as the elevation of the pond rises. To prevent excessive wear it is important that the velocity be not too high and to preclude plugging of the line the velocity should not be too low. The flow should be between 1,2 to 1,8 m per second for non-ferrous tails and as high as 3,6 to 4,2 m per second for taconite.

##### 3.3.5.2 Pumping

When pumping tailing slurry, the velocity should be the same as for gravity flow. The tonnage, material, and total head determine the pump to be used.

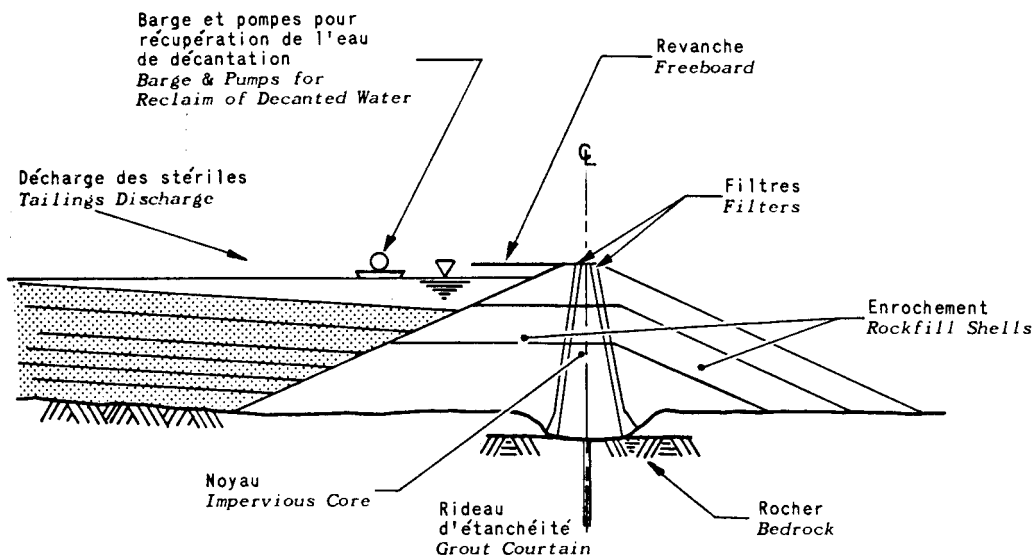
FIG. 3-5

Barrage de type conventionnel – fondations au rocher (Matériaux d'emprunt)  
*Water dam embankment type – direct ground support (Borrowed material)*

Des pompes centrifuges à revêtement de caoutchouc sont utilisées fréquemment dans les installations de concentrateurs à faible pression où l'eau d'isolation (seal water) est disponible et facilement contrôlée, tout en pouvant être utilisée aux fins de pompage vers une retenue de stériles ou vers des galeries et puits souterrains. La difficulté qui se présente avec ce type de pompe au cours de journées froides réside dans le maintien de l'eau d'amorce (seal water) à une pression supérieure à la pression de décharge de la pompe. Dans les cas où plusieurs stations de pompage disposées au long de la ligne de pompage sont nécessaires, un robinet de rejet doit être interposé à l'avant de chaque station avec un bassin de captation destiné à contenir le volume total contenu dans la ligne en cas de panne de courant.

Les pompes centrifuges en acier résistant à l'abrasion (AR steel) ou revêtues de plastique anti-abrasion sont beaucoup plus simples d'opération et probablement les plus populaires pour le pompage des boues de stériles. Certains plastiques sont anti-abrasifs tout comme le sont plusieurs nouveaux alliages d'acier.

Les pompes à déplacement positif (PD pumps) sont probablement les meilleures pour les pressions élevées se présentant par exemple dans les cas de lignes de plusieurs kilomètres de longueur. La boue de charbon est bien moins abrasive que la boue de concassage, mais les pompes du type PD sont aussi utilisées dans les lignes en provenance de concentrateurs, spécialement lorsque une pompe à haute pression est nécessaire et qu'il est difficile d'installer une station intermédiaire de pompage. Chaque installation doit être conçue pour les conditions locales. Les fabricants de pompes peuvent y aider beaucoup compte tenu de leur expérience et équipement.



Rubber-lined centrifugal pumps are common for low-head demands in concentrators where seal water is available and easily controlled, but can be used for pumping to a tailing pond or to underground fill stopes. The difficulty with this type of pump during cold winter operations is to assure that the seal water is always available and at a pressure above the pump discharge pressure. Where several pump stations are required in the pump line, a dump valve should be just ahead of each pump station, with a catch basin to hold the entire contents of the line in case of a power failure.

Centrifugal pumps of abrasive resistant (AR) steel or abrasive resistant plastic liner are much simpler to operate and are probably the most popular for tailing slurry pumping. Some new plastics are abrasive resistant as are many of the new alloy steels.

A positive displacement (PD) pump is probably the best for high pressures such as coal slurry lines many kilometers long. Coal slurry is much less abrasive than mill tailing, but PD pumps are also used on mill tailing lines, especially where a high pressure pump is required and it is difficult to install an intermediate pump station. Each job must be engineered for the conditions that exist. Pump manufacturers are helpful as they have the experience and equipment.

### 3.3.6 Systèmes de contrôle de l'eau

#### 3.3.6.1 Percolation verticale - Généralités<sup>16</sup>

La percolation de l'eau d'une retenue de stériles à travers le fond de cette retenue dans les eaux souterraines devient de plus en plus une cause de préoccupation en ce qui a trait à la qualité de l'eau. Les stériles d'origine métallique et non-métallique peuvent contenir des ions métalliques en solution; ces ions peuvent être nocifs si le pH est bas ou si les sulfures oxydent et dissolvent de façon continue les métaux qui migrent vers l'eau souterraine. La plupart des circuits de concentrateurs possèdent un pH fort et si la pyrite est présente, ils peuvent devenir acides, mais si le sol est basique les métaux se précipitent et cessent d'être nocifs. Une retenue de stériles non revêtue deviendra quasi imperméable avec une perméabilité (k) de  $10^{-6}$  ou  $10^{-7}$  cm/sec, dû à la consolidation et au drainage des boues au fond. Il est évident que jusqu'à ce que la retenue soit entièrement recouverte et que la consolidation ait eu lieu, la percolation à travers le fond peut être assez élevée si la perméabilité du sol naturel est elle-même élevée. Une façon de réduire cette perméabilité consiste à compacter le fond à une densité de 90% du Proctor Modifié ou 95% du Proctor Standard. Ceci sera particulièrement efficace si le sol naturel a une faible teneur en argile, et nettement moins coûteux qu'un revêtement en argile rapportée.

Dans les vallées en pays montagneux où la nappe phréatique est à des cotes élevées, un barrage en "travers de vallée" doit être conçu pour les débits naturels ainsi que pour la percolation à sa fondation. On utilisera dans ces cas des drains (tapis, bandes ou canalisations) pour acheminer l'eau de percolation vers la face aval du barrage d'où elle peut être retournée à l'usine, restituée à l'aval ou encore traitée et restituée. Ces drains sont nécessaires pour maintenir la nappe phréatique assez basse pour que l'eau de percolation ne jaillisse pas à la face aval du remblai d'amorce. La percolation totale doit être calculée et les drains conçus avec un facteur de sécurité de 10. Ce calcul se fait habituellement par la méthode des réseaux de débits (flow nets). (22)

Les filtres de roc et gravier entourant les drains doivent être compatibles avec l'eau des stériles. Si à un moment donné l'eau devient acide, il ne faut pas utiliser du calcaire. Le roc doit être de préférence du quartzite ou un autre type de roc sain et solide qui ne subira pas d'auto-concassage sous le poids du barrage de stériles à sa hauteur finale. Les filtres entourant les drains d'enrochements doivent être dimensionnés selon des critères de filtres acceptables (23, 24). Il faut que les stériles de la retenue ne passent pas ces filtres et ne s'échappent pas à travers le drain d'enrochements, ou encore ne le bouchent pas à la longue.

#### 3.3.6.2 Dérivation de l'eau

Le cours d'eau d'une vallée où un barrage de stériles doit être construit peut être abordé de trois façons différentes. Premièrement, il peut être canalisé dans un canal de dérivation contournant le barrage, dimensionné pour passer l'averse de projet et résister à toute défaillance lors des plus gros débits.

### 3.3.6 Water Control Systems

#### 3.3.6.1 Vertical Seepage - General (16)

The seepage of tailing pond water through the bottom of the pond and into the groundwater is becoming an increasing concern for water quality. Metal and non-metal tailings can carry metallic ions in solution that may be harmful if the pH is low or if sulphides oxidize and continually dissolve metals which go into the groundwater. Most mill circuits have a high pH, and if pyrite is present, can soon become acidic, but if the soil is basic the metals would precipitate and become harmless. An unlined tailing pond will eventually become almost impervious and have a permeability (k) of  $10^{-6}$  or  $10^{-7}$  cm/s from the consolidation and drainage of the slimes on the bottom. Of course until the pond is completely covered and consolidation takes place, the seepage through the bottom can be quite high if the natural soil permeability is high. One way to reduce such permeability is to compact the top foot or more to a density of 90-95 per cent of Standard or even Modified Proctor (18, 19, 20, 21). This would be especially effective if a small amount of clay were present in the natural soil. This would be far less costly than importing clay for a liner.

In mountain valleys that have a high water table, the cross valley dam must cope with the stream as well as seepage. Blanket, strip, or pipe drains should be used to carry the seepage water out to the downstream face of the dam where it can be returned to the mill, released downstream, or treated and released. These drains are a necessity to keep the phreatic line low so that no seepage water reaches the downstream face of the starter dam. The total seepage should be calculated and the drains designed for a safety factor of 10. This is usually done by flow nets (22).

The rock and gravel filters for the drains should be compatible with the tailing water. If the water at any time becomes acidic, limestone should not be used. The filters should consist of sound rock particles so that it will not crush under the weight of the ultimate tailing dam. The filters surrounding the coarse rock drain should be sized to acceptable filter criteria (23, 24). It is important that the tailing material should not penetrate this filter and escape through the coarse rock drain, or clog it up in time.

#### 3.3.6.2 Water Diversion

The stream in a valley where a tailing dam is to be constructed can be handled in three different ways. First, it can be by-passed around the dam in a diversion canal which must be sized to contain the design storm and must be constructed to resist failure under flooding. Second, the decant system and barge pumps

Deuxièmement, le système de décantation et les barges de pompage peuvent être dimensionnés pour épuiser l'eau, mais la revanche doit être assez grande pour contenir une partie du volume de l'averse en cas de panne des pompes.

Troisièmement, le cours d'eau peut être dérivé sous la retenue par une conduite en béton armé dimensionnée pour passer le débit en cause. Finalement, le cas peut se présenter où un évacuateur est possible sans aucun entretien après ré-insertion dans l'environnement (abandon). Aucune de ces options n'a de caractère permanent, mais elles sont néanmoins les plus acceptables actuellement.

Un des choix probablement le meilleur à long terme est de construire un évacuateur après l'abandon de la retenue pour canaliser toute l'eau du cours d'eau directement au niveau de retenue, par l'évacuateur.

Si le cours d'eau est pérenne un lac se formera, dont l'étendue dépendra de la cote du seuil de l'évacuateur par rapport au niveau de la retenue. Un cours d'eau à régime annuel créait un lac durant les ruissellements du printemps jusqu'à sa disparition par les effets d'évaporation et percolation.

La partie supérieure d'une retenue de stériles comblée peut être remplie de manière à ce qu'aucun lac ne se forme, bien que des dispositions soient nécessaires pour éviter toutes pertes de stériles possibles par-dessus l'évacuateur. Toutes les retenues de ce type ne sont pas situées de façon à ce qu'un évacuateur creusé dans le rocher soit possible ou même nécessaire.

### 3.3.6.3 Revêtements de retenues

Les revêtements d'argile artificiels ou spécialement confectionnés sont assez fréquents dans les barrages de stériles d'uranium. Si l'échange d'ions de sodium n'a pas lieu, le revêtement d'argile demeure imperméable. Avant d'utiliser un revêtement d'argile dans un milieu acide, la stabilité de l'argile doit être vérifiée. Si l'argile et l'eau des stériles sont compatibles, la perméabilité doit demeurer constante ou diminuer avec le temps.

Les revêtements artificiels sont imperméables, mais finissent par se détériorer. Ils sont coûteux et bien que stoppant les percolations, ils créent un autre problème. Les éléments fins des stériles qui ne peuvent se drainer viennent à se consolider lentement et à occuper plus d'espace que s'ils se drainaient par le fond. Les retenues revêtues au plastique ou à l'argile doivent être équipées de drains type tapis, "blanket", "strip" ou tuyaux (type French) posés par-dessus le revêtement pour évacuer l'eau de drainage vers le côté aval dans un bassin de captation pour recirculation. Ceci augmente la densité du matériau dans la retenue et lors de l'abandon de la retenue, la plus grande partie de l'eau se drainera du sable et de la zone de boues, rendant sa récupération plus facile. Plus que cela, s'il n'y avait pas de drains et si le revêtement se rompait, toute l'eau emprisonnée s'échapperait et serait perdue.



can be sized to remove the water, but the freeboard must be great enough to store a portion of the stormwater if the pumps fail. Third, stormwater can be by-passed beneath the pond in a reinforced concrete conduit sized for the flow. And last, a spillway may be possible and be maintenance free after abandonment. None of these options is permanent, but they are the best acceptable at the present time.

One option, and probably the best for the long run, is to construct a spillway after the pond is abandoned to channel all water from the creek directly on top of the pond and over the spillway. If the creek is perennial a lake will be formed, the size depending on the height of the invert of the spillway above the top of the pond. An annual stream would leave a lake during the spring run-off until it dried up through evaporation and seepage. The top of the completed tailing pond could be filled so that no lake should be formed but special arrangements would have to be made to avoid any loss of tailings over the spillway during flood. Not all ponds of this type are situated so that a rock spillway is possible or even necessary.

#### 3.3.6.3 Pond Liners

Artificial or specially prepared clay linings are quite common in uranium tailing dams. If sodium ion exchange does not take place, the clay lining remains impervious. Before using a clay liner where acid will be present, test the clay for stability. If the clay and tailing water are compatible, permeability should remain constant or decrease with time.

Artificial liners are impermeable, but they eventually deteriorate. They are expensive and though they stop seepage they create another problem. Tailing fines that cannot drain consolidate slowly so they occupy more space than if allowed to drain at the bottom. Ponds with plastic or clay liners should have a permeable drainage blanket, strip, or pipe drain on top of the liner for removing drain water to the downstream side to a catchment basin for recycling. This would increase the density of the material in the pond, and when the pond was abandoned, most of the water would drain from the sand and slime area, making it easier to reclaim. More than that, if there were no drain and the liner failed, all the trapped water would escape and go down the drainage.

#### 3.3.6.4 Piézomètres

Les barrages de stériles doivent être équipés de piézomètres en puits ou pneumatiques permettant de suivre constamment la nappe phréatique dans le remblai. Il faut installer un instrument dans le dépôt si de l'eau artésienne est soupçonnée. Les drains mentionnés ci-devant doivent être utilisés lorsque l'on s'attend à avoir un problème d'eau artésienne. De simples sources, si confinées par des stériles, peuvent produire des sous-pressions sous le dépôt. Ceci est particulièrement sérieux sous le remblai d'amorce et doit par conséquent être empêché. Le piézomètre en puits est bon dans le sable où l'évolution de l'eau est assez rapide pour enregistrer des montées et des baisses dans le tuyau en quelques heures, mais le piézomètre pneumatique doit être utilisé dans les argiles denses lorsque les changements de pression seulement sont mesurés plutôt que l'évolution de l'eau.

#### 3.3.6.5 Récupération de l'eau

##### Décantation

Dans le passé, la décantation a été la méthode la plus répandue de contrôle de l'eau des retenues. Les organes de décantation peuvent varier entre une simple conduite de 200 mm à paroi mince, pour une petite exploitation, et des tuyaux en acier de 1 m enrobés de béton armé résistant à des pressions atteignant 7 Mpa. Chaque conduite doit être posée sur une fondation solide, résister aux pressions prévues, avoir des anneaux anti-percolation au passage du remblai d'amorce et avoir des prises d'eau disposées de manière à contrôler le plan d'eau dans la retenue. Chaque organe de contrôle doit durer la vie de la mine, et même plus, si utilisé pour le contrôle des crues après l'abandon de l'exploitation.

##### Avantages:

1. Contrôle assuré de l'eau;
2. N'utilisant pas de sources d'énergie, ils restent en service même en cas de panne de ces sources.

##### Désavantages:

1. Plus coûteux que les barges de pompage;
2. L'accès aux tours de décantation peut exiger des passerelles longues et coûteuses;
3. La réparation des lignes de décantation endommagées peut s'avérer difficile ou impossible;
4. Des coûts de pompage plus élevés du fait de têtes de pompage croissantes à mesure que la hauteur du barrage s'accroît;
5. Danger de dommages importants à la tour et à la conduite passant sous le barrage.

##### Barges de pompage

Les barges de pompage deviennent actuellement plus populaires lorsque le terrain le permet. Des flancs raides dans les grandes retenues constituent un terrain idéal parce que le pompage se fait à une assez grande profondeur à distance des boues. Ces dernières

#### 3.3.6.4 Piezometers

Tailing dams should have piezometers to constantly monitor the seepage line in the embankment. These instruments should be installed within the impoundment if artesian water is suspected. The previously mentioned drains should be used where artesian water may be found or suspected. Simple springs, if confined by tailing, can cause uplift beneath the impoundment. This is especially serious beneath the starter dam and must be prevented. The open well piezometer is good in sand where water movement is rapid enough to register water rise and fall in the standpipe within hours, but piezometers with a more rapid response should be used in dense clays. Vibrating wire and strain-gauged diaphragm piezometers are equally acceptable.

Piezometers should be protected where pore water is highly acidic.

#### 3.3.6.5 Water Recovery

##### Decant

In the past, decants have been the most common method of water control in the pond. These can be anything from a 200 mm thin wall steel pipe on a small operation to twin, 1,000 mm steel pipes encased in reinforced concrete to withstand 70 Mpa pressure. Each must be laid on a firm foundation, withstand the pressure expected, have seep rings through the starter dam, and have water inlets to control the water elevation in the pond. All must last the life of the mine or longer if used for flood control after abandonment.

##### Advantages:

1. Positive water control.
2. Uses no power so will be effective even during power failure.

##### Disadvantages:

1. More costly than barge pumps.
2. Access to decant towers may require costly long walkways.
3. Damaged decant lines may be difficult or impossible to repair.
4. Higher pumping costs because of increased head as dam rises.
5. Danger of major damage to tower and culvert passing under dam.

##### Barge Pumps

Barge pumps are becoming more popular wherever the terrain permits. Steep terrain in large ponds is ideal because the pump is in fairly deep water and out of the mud. Slimes are a problem when the maximum slope of the land is only 1-2 per cent.

constituent un problème quand la pente maximale du terrain est de seulement 1 à 2%.

#### Avantages

1. Une construction beaucoup moins onéreuse et des coûts de pompage moindres à cause des têtes de pompage réduites, à mesure que le remblai monte;
2. Bon contrôle de l'eau;
3. Bon accès aux pompes;
4. Dans les régions sismiques, moins de risques de rupture qu'avec des tours ou conduites.

#### Désavantages:

1. Aucun moyen de se débarrasser de l'eau lors de pannes en cas de crues;
2. Une revanche plus grande requise comme protection contre les crues;
3. Gel pendant les températures extrêmes d'hiver (le voisinage de la pompe peut être maintenu libre de glaces par injection d'air autour de la barge);
4. Ne peut être utilisée qu'en eau profonde.

#### Siphons

On ne doit utiliser des siphons dans des retenues de stériles que lorsqu'on a affaire à un barrage de retenue conventionnel. Tout barrage construit à l'aide de matériaux d'emprunt ou de stériles, simplement déposés sans compactage, sans avoir fait l'objet d'études d'ingénierie préalables, ne doit jamais être soumis à une charge d'eau. Chaque nouvelle levée est construite par-dessus la pire couche de boues possible et la stabilité devient ainsi un problème sérieux. Les siphons requièrent de faibles investissements et de faibles coûts d'opération, mais ne retirent pas autant d'avantages de la cote du plan d'eau que les barges. Des hélices submergées peuvent être utilisées pour entraîner de l'eau plus chaude vers la surface et empêcher la formation de glace à l'entrée du siphon.

#### 3.3.7 Plans d'abandon

La planification en vue d'une ré-insertion dans l'environnement naturel doit se faire en même temps que les plans de construction et une partie des travaux requis à cette fin doit se faire au cours de la phase initiale de construction. Le sol de surface peut être entreposé aux fins de revégétation pour être par la suite épandu sur la face aval du remblai d'amorce en vue de son arborisation même avant le début de la construction. On veillera à ne pas recouvrir la surface avec un sol moins perméable que celui du remblai d'amorce si ce dernier doit servir comme barrage perméable laissant passer l'eau librement. De la même façon, il ne faut pas recouvrir des drains de gravier avec du sol de surface, ce qui empêcherait le drainage. Les pentes et paliers (risbermes) doivent être conçus en vue de leur revégétation.

Advantages:

1. Much less costly construction and lower pumping costs because of reduced head as the embankment rises.
2. Good water control.
3. Good access to pumps.
4. In seismic regions, lesser risk of failure than decant towers or pipes.

Disadvantages:

1. No way to get rid of water should a power failure occur during a flood.
2. Higher freeboard required to protect against flood.
3. Freezing during extreme winter weather (area around pump can be kept ice free by discharge of low pressure air around barge).
4. Can be used in deep pools only.

Siphons

Siphons in tailing ponds should not be used except with a water-type dam. Dams built of borrow or tailing, just dumped in place without prior design and with no compaction, should not have the water against the dam. Each successive lift is built over the worst possible slime layer, and stability will become a serious problem. Siphons have a low capital and operating cost, but cannot take advantage of pond elevation as barge pumps can. Underwater propellers can be used to bring warmer water to the surface to prevent icing of the siphon intake.

3.3.7 Abandonment Plans

Abandonment plans (see chapter 5) should be made at the same time as construction plans, and some abandonment construction performed during the initial construction phase. Topsoil can be stockpiled for revegetation and can be placed on the downstream slope of the starter dike and planted even before production begins. Care should be taken not to cover the surface with less permeable soil than is in the starter dam if it is to be a permeable dam built to let water pass freely through it. Nor should topsoil be placed over gravel drains to impede drainage. The embankment slopes and benches should be planned so they can be planted. During construction, the benches should be sloped to the inside to prevent accumulated water from eroding the embankment to the next lower bench. On some sites precipitation is caught on each bench

Pendant la construction il est recommandé de donner aux paliers et bermes une pente vers l'intérieur pour empêcher l'eau accumulée d'éroder la levée inférieure.

À certains sites la précipitation est captée sur chaque palier et canalisée vers la banquette inférieure suivante. L'érosion par le vent et l'eau, ainsi que le contrôle de celle-ci constituent les problèmes les plus importants lors de l'abandon.

Dans les zones où la précipitation est de 400 à 1000 mm, avec des stériles et un sol de surface non acides, l'engazonnement et l'arborisation ne constituent pas de problème. Même sans un sol de surface, l'arborisation avec une tourbe (Mulch) et un fertilisant permettent une bonne croissance au bout de quelques années. Des stériles à forte acidité recouverts d'une couche épaisse (30 cm) de sol peuvent produire de la végétation, mais celle-ci serait d'un type à racines peu profondes. Les rejets du décapage de mines à ciel ouvert peuvent, même dans des zones désertiques, favoriser la croissance de gazon et plantes indigènes, bien que de l'eau et du fertilisant supplémentaires soient nécessaires pendant quelques années.

Le roc rejeté du décapage de mines (7 cm) peut être utilisé comme matériau de recouvrement dans les cas de stériles fortement acides pour supprimer la poussière sur les pentes et paliers, si un sol de surface n'est pas disponible. Un évacuateur est nécessaire après l'abandon, à moins d'une grande étendue de drainage à l'amont avec un débit intermittent.

Les débits des drains d'une retenue de stériles abandonnée requièrent de la surveillance pendant quelques années et l'eau doit être traitée avant sa restitution à l'aval. La période au cours de laquelle ceci sera nécessaire dépend de la teneur en sulfure et de la précipitation annuelle. Il est à espérer que dans quelques années, l'eau des drains sera assez pure pour être restituée sans traitement et la surface complètement abandonnée sans d'autres dépenses additionnelles. Chaque remblai de stériles aurait ses propres plans "d'après opération", (post-exploitation), selon la teneur en métaux des stériles, selon le terrain, le niveau, le grandeur et la hauteur du remblai, le climat, etc.

### 3.3.8 Construction

Si l'exploration de l'emplacement et la conception sont bien exécutés, les plans de construction pourront être spécifiques avec mention de détails tels le volume de décapage de sol de surface (mort-terrain) et son entreposage, la profondeur de l'exécution pour la fondation du remblai de démarrage ainsi que le volume de celui-ci. L'origine, la dimension et le volume du gros roc pour les drains doivent être spécifiés, de même que les dimensions de détail, la configuration de chaque drain et l'épaisseur des filtres par-dessus et par-dessous les drains de gros roc. Si l'on prévoit utiliser du tuyau dans les drains, la dimension des ouvertures, la forme et leur position sur le tuyau doivent être spécifiées.

and piped down to the next lower bench. Wind and water erosion and water control are the biggest problems after abandonment. In areas, with 40-100 cm of precipitation and non-acidic tailing and topsoil, grass and trees can be easily grown. Even without topsoil, planting with a mulch and fertilizer can produce fairly good growth after a few years. High acidic tailings with a thick layer of topsoil (30 cm) can produce vegetation, but it would be limited to shallow rooted plants. Open pit strip waste, even in desert areas, can grow native grass and plants, yet it needs supplemental water and fertilizer for a few years. Scalped mine waste rock (7 cm) can be used as a cover for highly acid tailing to suppress dust both on the top and on the benches of slopes if no topsoil is available. A spillway is needed after abandonment even if there is a large drainage area upstream with intermittent streamflow.

Flow from the drains of an abandoned tailings pond would need monitoring for a few years, and if necessary the water should be treated before discharge. How long this would have to be done would depend on the sulphide content and annual precipitation. In a few years the drain water could be pure enough to be discharged without treatment, and the area completely abandoned without any further expense. Each tailings embankment would have a different post-operating plan depending on the metallic content of the tails, and the terrain, elevation, size and height of embankment and climate.

### 3.3.8 Construction Plan

If site investigation and design are well done, construction plans can be specific with details of volumes for topsoil stripping and storage, depth of excavation for the base of the starter dam, and starter dam volume. The source of supply, size, and volume of coarse rock for drains must be specified. Detail size and shape of each drain and thickness of filters above and below coarse rock drains. If pipe is to be used in the drains, the designer should calculate the perforation size, the pipe diameter, shape and position. All steel pipes must have an asphalt coating to protect against rust. If a decant line is to be constructed on soil, below-grade excavation and compaction may be necessary. In-place density samples may be necessary along the pipeline route to

Tous les tuyaux doivent avoir une couche d'asphalte comme protection contre la rouille. Si une conduite de décantation doit être construite dans un sol, de l'excavation sous profil et un compactage approprié peuvent s'avérer nécessaires. Des essais de densité in situ peuvent être nécessaires sur le parcours de la conduite pour déterminer les endroits où il faut un compactage additionnel (18,19). Des matériaux d'emprunt seront désignés pour certaines zones du remblai d'amorce selon la granulométrie et la perméabilité à la densité spécifiée. Des essais de teneur en eau et de densité in situ sont nécessaires durant la construction. Un compactage à la main est nécessaire autour des anneaux anti-percolation des lignes de décantation et de drainage.

Grâce à de bons plans et devis de construction, un complexe de stériles peut facilement faire l'objet d'un appel d'offres ou encore être construit avec les ressources propres de l'exploitant, les coûts de réalisation étant dûment estimés.

### 3.3.9 Plans d'exploitation

L'ingénieur concepteur et l'exploitant d'une mine déterminent la méthode globale d'exploitation, à savoir la méthode amont, aval ou de l'axe central, remblai d'emprunt ou barrage de rétention.

La facilité d'opération, la sécurité, de faibles exigences en main-d'oeuvre, ainsi que de faibles coûts d'exploitation doivent être compatibles avec les coûts des investissements. Il arrive parfois que grâce à un coût d'investissement un peu plus élevé les coûts d'opération soient considérablement réduits. Rares sont les endroits offrant de telles conditions et plus souvent les coûts des investissements sont égaux aux coûts d'opération.

Pour réduire les coûts, dans le cas de la méthode amont avec des lances à robinets, "spigots", il faut prévoir une tête de pompage suffisante pour obtenir un refoulement de 9 m entre deux déplacements successifs de la conduite-maîtresse. Les relocalisations des lances doivent être aussi peu fréquentes que possible et seulement pour bien contrôler l'étendue de la retenue autour de l'ouvrage de décantation par un simple tour d'un robinet. Un déplacement fréquent des lances peut cependant s'avérer nécessaire pour réduire la poussière à l'occasion. Si l'eau de la retenue entraîne une montée assez rapide de la nappe phréatique, des puits ou des piézomètres permettront d'en suivre la montée afin que le "spigotage" puisse être arrêté avant que la nappe n'atteigne un niveau critique. Il conviendra de produire une coupe en travers du remblai montrant la nappe phréatique maximale permise, soit la hauteur critique pour un facteur de sécurité de 1.5. (25, 26, 27).

On pourra localiser des points permanents aux paliers abandonnés pour la mesure des déformations horizontales et verticales du remblai. Des inclinomètres (slope indicators) sont aussi employés pour la mesure de ces déformations.

Toutes les conduites de décantation ou de drainage doivent être d'accès facile aux fins d'inspection au terme de chaque poste de travail. L'exploitant doit procéder à l'inspection de la face



determine where extra compaction is needed (18, 19). Borrow would be scheduled to go to specific areas in the starter dam, depending on gradation and permeabilities at the specific density. In-place moisture and density tests would be required during construction. Hand compaction is necessary around the seep rings on the decant and drain lines.

With good construction plans and specifications, tailing area construction can easily be put out for bids or done in-house with the costs easily estimated.

### 3.3.9 Operating Plans

The design engineer and the mine operator determine the overall operating method, whether upstream, downstream, centreline, borrow or water-type dam. Ease of operation, safety, low manpower requirements, and low operating costs must be balanced with capital costs. Sometimes conditions are such that, with a little more capital cost, operating costs can be reduced substantially. Few areas have such conditions, and capital and operating costs are about equal.

To cut costs in the upstream method, using spigots, there should be enough head so that at least a 30-foot lift can be made between moves of the header pipe. Spigot changes should be made as required and only then to control the location of the water pool around the decant by a turn of a valve. Moving the spigots often may be required to reduce dust occasionally. If water from the beach raises the phreatic line quite rapidly, arrange open wells or piezometers to monitor the rise so that spigoting can be stopped before the line reaches a critical height. A cross section of the embankment showing the maximum allowable phreatic line that is the critical height for a 1.5 factor of safety should be readily available to compare with field measurements (25, 26, 27).

Permanent points can be placed on the abandoned benches to measure the horizontal and vertical movements of the embankment. Slope indicators can also be used to measure movement.

All decant and drain outflow lines should be easily accessible for inspection. The operator on each shift should inspect the downstream face for seepage, sloughs, or any evidence of

aval pour rechercher la percolation, des éboulis ou toute évidence d'instabilité, ainsi que des affaissements locaux (sink holes) dans la retenue qui seraient des indices d'érosion interne (piping). En réglant le débit vers le décanteur, l'eau de décantation peut être surveillée de manière à ce qu'aucune boue n'entre dans les conduites. La présence de sable dans le débit du décanteur indiquerait un bris dans la conduit qui serait de réparation difficile ou impossible. Lors de gros vents, il se peut que le niveau de la retenue doive être surélevé pour assurer un déversement propre, vu que l'action des vagues dans des eaux peu profondes soulèvera les boues du fond de la retenue et les maintiendra en agitation constante.

L'exhaussement des bernés avec du sable dans l'application de la méthode amont requiert un temps d'arrêt des opérations trop long. Pour cette raison, deux zones séparées sont nécessaires dans le cas d'une nouvelle mine ou bien une zone suffisamment grande pour que sa moitié puisse être arrêtée durant six mois ou un an.

Selon la grosseur des grains, le temps qu'il fait, etc., plusieurs mois peuvent être nécessaires avant qu'un bulldozer puisse accéder à la plage et pousser du sable vers le remblai ou qu'une rétro-excaveuse "dragline" puisse aller sur la plage aux mêmes fins. Un temps amplement suffisant doit être alloué à cette partie de l'opération, laquelle peut être une des inconnues de la conception.

Un nouveau système a été mis au point pour la méthode de l'axe central pour contrecarrer ce retard: la conduite maîtresse et les hydrocyclones sont installés entre deux tuyaux verticaux (upright) de manière à ce que la conduite tout entière puisse être remontée à l'aide de cylindres hydrauliques tout en demeurant en service.

### 3.3.10 Revue de la conception, de la construction et de l'opération

Les plans d'un remblai de stériles doivent être revus par un ingénieur géotechnicien dûment spécialisé dans la conception de ce type de remblai. Les résultats des essais sur les propriétés physiques des sols de fondation, des sols des remblais et du matériau stérile de construction doivent être étudiés à fond.

L'ingénieur assigné à cette revue n'exigera aucun essai à moins d'un doute évident sur un matériau mauvais en apparence. Il doit cependant vérifier les calculs du facteur de sécurité en tenant compte de la géométrie du remblai et de  $\phi$  et  $C'$  (28, 29, 30). Le volume d'eau prévu dans le drain dû à la perméabilité horizontale et verticale du sable est particulièrement critique et son calcul n'est pas trop difficile si on utilise la méthode des réseaux 22, 31, 32.

Vu que le drain est une composante critique de l'ensemble, il est habituel d'utiliser un facteur de sécurité de 10.

La revue de la construction doit porter sur chaque phase depuis la position du tas de sol de surface jusqu'à l'installation des conduites. La mise en place des drains et filtres et la mise en place du matériau sur le remblai d'amorce proprement dit revêtent

instability as well as sink holes in the pond which would indicate piping. By regulating the flow into the decant, decant water can be monitored so that no slime enters the line. Sand in the decant discharge would indicate a break in the line which is difficult or impossible to repair. During high winds the pond water elevation may have to be raised to ensure a clean overflow, as the wave action in shallow water will pick up the slime from the bottom of the pond and keep it in constant agitation.

Raising the berm with sand in the upstream method causes a great deal of downtime for the operation. For this reason, two separate ponds are required for a new mine or an area large enough so that half can be shut down for 6 months or a year.

Depending on grain size and weather, it may take several months before a bulldozer can get on the beach to push up sand for the embankment or a dragline can go to the beach for the same purpose. Ample time must be allowed for this part of the operation, which is often one of the design unknowns.

One new system has been devised for the centreline method to overcome this delay. By having the header pipe and cyclones mounted between two upright pipes, the entire pipeline can be raised by hydraulic cylinders while it is in operation.

### 3.3.10 Review of Design, Construction and Operation

Plans for a tailing embankment should be reviewed by a competent geotechnical engineer specializing in tailing embankment design. The results of the physical property tests of the foundation soils, embankment soils, and tailing construction material should be thoroughly studied.

The geotechnical review engineer will not usually require any tests unless there is an obvious question on some material that appears wrong. But he should check the calculations for the factor of safety using the embankment geometry and material strength (28, 29, 30). The volume of water expected in the drain from the horizontal and vertical permeability of the sand is especially critical, and is not too difficult to calculate using flow nets (22, 31, 32). Because it is critical, a safety factor of 10 for the drain is common.

The construction review should cover everything from the position of the topsoil stockpile to pipe installation. Of special importance is the placement of drains and filters and the placement of the material on the starter dam itself so that the soil, sand, or

une importance particulière en ce qu'il importe de bien s'assurer que le sol, le sable et le gravier de chaque puits d'emprunt sont aux endroits désignés dans le barrage. Le degré de compactage spécifié pour le remblai d'amorce est critique lui-aussi (18, 19).

Le mode d'exploitation d'un dépôt de stériles est assez normalisé pour chaque méthode de mise en dépôt avec des variations locales à cause du tonnage, de la dimension des grains et des préférences locales. L'ingénieur qui revoit le mode d'exécution peut se rendre très utile s'il connaît une meilleure méthode de mise en dépôt, une innovation ou n'importe quoi pouvant influencer le plan global. Par conséquent, il est impératif que l'ingénieur concepteur connaisse les tendances les plus récentes des méthodes d'exploitation et qu'il veille à ce que son plan soit l'objet de revue avant de commencer tout travail de conception. La décision prise au début de la phase de conception déterminera le mode d'opération tout entier par la suite. C'est pourquoi cette phase est aussi importante. Une revue finale de tous les plans doit être faite évidemment avant de commencer la construction.

### 3.4 Fondations

#### 3.4.1 Généralités

La conception réussie d'un barrage de stériles dépend en grande partie d'une évaluation aussi complète que possible de la fondation. La mise en dépôt des résidus miniers et industriels conjointement avec l'eau utilisée dans le procédé industriel requiert une évaluation des fondations qui satisfasse les critères structurels autant que les critères anti-pollution. Les préoccupations structurelles normales peuvent s'aggraver lorsqu'il devient nécessaire de situer le barrage et le dépôt au-dessus des installations minières ou de gisements de minerai devant être exploités ultérieurement. L'évaluation de la perméabilité et de la percolation peuvent avoir une importance accrue dans la détermination des agents contaminants et dans le maintien de toutes lâchures (releases) à l'intérieur des limites établies par les agences de contrôle (regulatory agencies). Williams (1) discute de la nature en général de différents secteurs de l'industrie minière, de leurs problèmes de disposition, technologie, limitations des effluents. Le volume de déchets disponibles peut permettre des solutions peu onéreuses pour quelques problèmes de fondations; cependant, les limitations imposées par la superficie de terrain disponible, la nécessité de distances de transport courtes, ainsi que les caractéristiques des déchets et des effluents peuvent conduire à des traitements de fondation qui pourraient être évités autrement dans le cas de barrages conventionnels.

La fondation doit avoir une résistance adéquate pour supporter les charges des remblais et de toute structure incorporée dans le remblai. La fondation doit aussi être suffisamment imperméable pour contrôler les percolations et pour satisfaire les exigences structurelles et anti-pollution.

gravel from each borrow pit goes to the right place in the dam. The compaction specified for the starter dam is also critical (18, 19).

The operating procedure for a tailing impoundment is fairly standard for each method of deposition, with local variations because of tonnage, grain size, and local preference. The engineer reviewing the operating method can be most helpful if he knows of a better method of deposition, an innovation, or anything that can influence the overall plan. It is therefore imperative that the design engineer know the latest trends in methods of operation, plus having his plan concept reviewed before any design is started. The decisions made at the start of design determine the entire plan from then on. That is why this phase is so important. Of course, a final review of all plans should be made before construction starts.

### 3.4 Foundations

#### 3.4.1 General

The successful design of a tailings dam is largely dependent on a thorough evaluation of the foundation. Disposal of mine and mill waste, using the water from the milling process, demands that the foundation evaluation satisfy both structural and pollution requirements. Normal structural concerns may be compounded by having to locate the dam and impoundment over mine workings or ore bodies which have yet to be mined. Assessment of the permeability and seepage may have an added dimension of determining possible contaminants and maintaining any release within limits established by regulatory agencies. Williams<sup>7</sup> discusses the general nature, disposal problems, technology, and effluent limitation of many segments of the mining industry. The volume of waste available can allow inexpensive solutions to some foundation problems; however, the restraints imposed by the available land, the need for short transportation distance, and the characteristics of the waste and effluent may force foundation treatments which might be avoided in a conventional embankment dam.

The foundation must have adequate strength to support the loads of the embankment and any hydraulic structure included in the embankment. The foundation must also be sufficiently impermeable to control seepage and satisfy structural and pollution requirements.

### 3.4.2 Tassements

#### 3.4.2.1 Fondations rocheuses

Dans l'absence de cavités d'exploitations minières ou autres, le tassement d'une fondation rocheuse solide ne constitue pas en général un problème dans la conception d'un barrage en remblai. Pour quelques barrages sur le rocher, des tassements de fondations dépassant 305 mm sont rapportés par Sherard (33), une telle considération ne peut être ignorée. Comme il est noté par Jansen (34) dans sa discussion de barrages en terre, des "tassements différentiels sur des surfaces de rocher irrégulières ne sont pas rares".

Les barrages de stériles ne font habituellement pas l'objet des mêmes contrôles en cours de construction que les barrages conventionnels. Il faut accorder une attention particulière aux contacts avec le rocher tant dans le cas des remblais d'amorce que dans les cas de barrages de stériles, afin d'éviter la fissuration de sols cohérents. Cette fissuration peut être provoquée par des tassements différentiels entre un fond de vallée compressible et ses flancs rocheux ou affleurements de roc. Les aspects mécaniques de la fissuration sont présentés par Sherard<sup>33</sup>.

L'existence d'ouvrages miniers souterrains abandonnés, en exploitation ou proposés en-dessous de remblais ou dépôts n'est pas rare. La grandeur et l'écartement d'ouvertures souterraines, conjointement avec la profondeur et la qualité du mort-terrain affecteront la conception du barrage et de la mine. Une défaillance des fondations peut se traduire par:

- une percolation excessive avec les coûts de pompage qui en résultent;
- une inondation rapide avec les risques que ceci comporte pour le personnel en souterrain;
- la perte de la mine;
- la perte de la retenue.

La compagnie Engineers International Inc.<sup>35</sup>, ainsi que Skelly et Loy<sup>36</sup>, et K. Wardell and Partners<sup>37</sup>, par contrat avec le gouvernement, ont fourni des études approfondies, accompagnées d'une vaste bibliographie et de méthodes analytiques pour déterminer les effets en surface des travaux miniers.

La présence de cavités de dissolution ou de matériaux de fondation pouvant être attaqués par l'eau tels que les schistes sensibles à l'eau, le calcaire et le gypse doit être déterminée assez tôt pour qu'il soit possible d'en tenir compte dans les études de conception. De plus, l'effluent des concentrateurs (mill effluent) peut être porteur de produits chimiques pouvant attaquer la fondation et, le cas échéant, les services d'un chimiste de fondations permettront d'identifier les problèmes qui pourront être évités si l'on change de site ou si l'on traite l'eau des concentrateurs avant sa restitution à la retenue.

### 3.4.2 Settlement

#### 3.4.2.1 Rock Foundations

In the absence of mining or other underground cavities, the settlement of a sound rock foundation is generally not a problem in the design of an embankment dam. Under some dams founded on rock, foundation settlements of more than 305 mm are reported by Sherard<sup>33</sup> and this design consideration cannot be ignored. As noted by Jansen<sup>34</sup> in his discussion on earth dams, "differential settlement at irregular rock surfaces has not been an uncommon problem".

Tailings dams will generally not receive the same quality of construction control as a conventional dam. A large number of tailings dams is built from non-cohesive materials, and are therefore not subject to cracking. Particular attention should be given however to rock contacts in both starter dams and tailings dams to avoid cracking of possible cohesive soil zones in the embankment caused by differential settlement between a compressible valley bottom and rock abutments or outcrops. Mechanics of cracking is presented by Sherard<sup>33</sup>.

The existence of abandoned, active or proposed mine workings under the dam or impoundment is not an uncommon occurrence. The size and spacing of the underground openings, together with the depth and quality of the overburden will affect the design of the dam and the mine. Foundation failure can result in:

- . excess seepage with resulting pumping costs,
- . rapid inundation with hazard to underground personnel,
- . loss of the mine,
- . loss of the dam impoundment.

Engineers International Inc.<sup>35</sup>, Skelly and Loy<sup>36</sup>, and K. Wardell and Partners<sup>37</sup> under government contract, have provided comprehensive studies, together with an extensive bibliography, and analytical methods for determining the surface effects of underground mines.

The presence of solution cavities or foundation materials which can be attacked by water such as water sensitive shales, limestone and gypsum should be determined early enough to be accommodated in the design. In addition, the mill effluent may carry chemicals which can attack the foundation and where this possibility exists, the services of a geochemist may identify problems which can be avoided by changing sites or treating mill water before release into the pond.

### 3.4.2.2 Fondations compressibles

La théorie de la consolidation et des méthodes analytiques permettant de prédire les tassements est présentée dans plusieurs ouvrages de mécanique des sols<sup>38, 21, 39</sup>. Le tassement de la fondation peut conduire à la fissuration du remblai, à des pressions interstitielles élevées dans les fondations, ainsi qu'à la distorsion verticale et horizontale des conduites enfouies souvent utilisées dans les systèmes de décantation des barrages de stériles. Rutledge et Gould<sup>40</sup> font un rapport sur une étude des déformations horizontales et verticales de conduites de béton et fournissent des méthodes permettant de conférer de la flexibilité aux joints des conduites.

Blinde<sup>41</sup> fait référence à la difficulté d'analyser les forces agissant sur les conduites traversant les barrages de stériles. Taylor et d'Appolonia<sup>42</sup>, ainsi que Walker<sup>43</sup> présentent des données sur les problèmes de tassement rencontrés dans les cas de fondations compressibles.

Le concept de remblai d'amorce est utilisé fréquemment pour profiter de la topographie naturelle par la construction d'une série de remblais d'amorce entre les verrous (hillocks) du terrain naturel et/ou des affleurements rocheux. La mise en place subséquente de stériles utilise la crête du remblai d'amorce et le terrain naturel comme fondation pour la partie structurelle d'un barrage de stériles qui permet d'entreposer des boues et de contrôler l'eau en temps de crue. La conception doit tenir compte de tassements différentiels entre le remblai d'amorce et le terrain naturel ainsi que les effets de l'eau des stériles sur cette combinaison de matériaux de fondation. De grandes parties des régions arides et semi-arides sont recouvertes de sols ayant de faibles densités et de fortes résistances à l'état sec. Ces sols sont surtout déposés par le vent (loess), bien que d'autres origines soient possibles. Avec l'addition d'eau en provenance de la retenue, ces sols connaîtront une réduction importante en volume pouvant conduire à la rupture totale de la fondation<sup>43, 33, 45</sup>.

Le U.S. Bureau of Reclamation rapporte des cas réussis de pré-humidification et fournit des devis types<sup>44</sup>; par contre, Sherard<sup>33</sup> fait allusion aux risques de liquéfaction si la fondation est pré-humidifiée sans se rompre.

### 3.4.2.3 Résistance

#### Fondations rocheuses

Le type, l'état et l'homogénéité d'une fondation rocheuse doivent être évalués de façon à déterminer une résistance de conception. Bien que la résistance du roc ne soit pas habituellement un problème en ce qui concerne les barrages en remblai, la hauteur d'un barrage de stériles ne connaît pas de limites et même les hauteurs finales prévues doivent souvent être augmentées ultérieurement du fait de changements de la valeur économique du minerai. La plupart des rochers sains offrent une résistance adéquate. Sherard<sup>33</sup> et Jansen<sup>34</sup> discutent de l'évaluation des dangers dûs aux schistes et tuffs altérés, aux diaclases, à la foliation et aux failles.



#### 3.4.2.2 Compressible Foundations

Consolidation theory and analytical methods to predict the expected amount of settlement are presented in many soil mechanics texts (38, 21, 39). Settlement of the foundation can lead to cracking of the embankment, excess foundation pore pressures and both vertical and horizontal distortion of the embedded conduits which are often used in the decant systems of tailings dams. Rutledge and Gould<sup>40</sup> report on a study of the horizontal and vertical movements of concrete-pipe conduits and provide a means of pipe joint openings. Blinde<sup>41</sup> points out the difficulty in analyzing the forces on conduits through tailings dams. Taylor and D'Appolonia<sup>42</sup> and Walker<sup>43</sup> provide data on settlement problems encountered with compressible foundations.

The starter dam concept is often used to take advantage of the natural topography by constructing a series of starter dams between the hillocks of natural soil and/or rock outcroppings. Subsequent tailings placement utilizes the crest of the starter dam and the natural ground as a foundation for the structural portion of the tailings dam which provides both storage for the slimes and control of flood water. The design should consider differential settlement between the starter dam and the natural ground and the effects of the tailings water on this combination of foundation material. Large parts of the arid and semi-arid regions are covered with soils of low density and high dry strength. These soils are primarily wind deposited (loess) but may have other geologic origins. With the addition of water from the tailings pond, these soils will suffer from a substantial decrease in volume and may result in total collapse of the foundation (43, 33, 45). The U.S. Bureau of Reclamation reports successful pre-wetting and provides sample specifications<sup>44</sup>; however, Sherard<sup>33</sup> points out the risk of liquefaction if the foundation is pre-wetted but not collapsed.

#### 3.4.2.3 Strength

##### Rock Foundations

The type, condition and homogeneity of a rock foundation must be evaluated in order to determine a design strength. While rock strength is not normally a problem in an embankment dam, the height of a tailings dam is virtually unlimited and planned ultimate heights may often be increased at some future date because of changes in the economic value of the ore. Most sound rock will provide adequate strength. Sherard<sup>33</sup> and Jansen<sup>33</sup> discuss the evaluation of hazards from weaker shales and tuffs, joints, foliation and faults. The presence of planes of weakness within the rock mass must be determined to avoid the possibility

La présence de plans de faiblesse dans le rocher doit être établie pour éviter la possibilité de glissements dans la fondation. Les barrages de stériles sont construits souvent à flanc de coteau où l'effet combiné des boues, de l'eau et du poids du remblai peut donner lieu à des éboulements. Fang et Brown<sup>39</sup> et le Corps of Engineers<sup>13</sup> offrent des méthodes d'analyse des éboulements par glissement de translation et de rotation.

#### Sols de fondations

Le choix de résistances de sols à utiliser dans l'analyse peut constituer un problème difficile et doit tenir compte des conditions prévalant pendant la construction et l'exploitation du site. La méthode de mise en dépôt des résidus est telle qu'une très grande quantité de résidus peut être mise en place dans un délai relativement court et le besoin d'une mise en place aussi rapide est fonction des exigences minières et industrielles. Les matériaux de fondation doivent disposer d'un temps de consolidation suffisant pour atteindre les résistances de conception. Il est à noter que dans la méthode amont de construction des remblais la partie structurale du remblai est construite par-dessus les boues qui agissent alors comme fondation pour le remblai suivant. Fang<sup>39</sup>, le Corps of Engineers<sup>46</sup>, Sherard<sup>33</sup> et Lambe<sup>27</sup> discutent l'interprétation des essais de résistance et l'application de l'analyse des contraintes totales et effectives. Taylor et d'Appolinia<sup>42</sup> et Walker<sup>43</sup> rapportent des résultats d'essais et de chantier quant au comportement de deux fondations sur terrain très mou. La liquéfaction induite par tremblement de terre fait l'objet de discussion dans une section ci-après; cependant, le projeteur doit envisager la possibilité de liquéfaction due à des déformations internes, ou liquéfaction induite par des déformations chaque fois que des sables non tassés et saturés affectent la structure.

#### 3.4.3 Percolations

La quantité et l'effet des percolations pouvant avoir une influence majeure sur la méthode utilisée pour la mise en dépôt des rejets, les effets structurels et de pollution doivent être considérés assez tôt au cours de la conception. La théorie et l'usage des réseaux pour déterminer les quantités, la situation, ainsi que les forces et pressions dues à la percolation sont présentées par Cedergreen<sup>22</sup> et Casagrande<sup>47, 48</sup>. Une application de l'analyse par éléments finis aux problèmes de percolation est présentée par Kealy et Williams<sup>49</sup> et Kealy et Busck<sup>50</sup>.

La résistance des fondations à l'action de l'eau par érosion et par dissolution doit être évaluée. La percolation à travers les joints et fissures du rocher peut contribuer à dissoudre le rocher, à attaquer le liant ou à aggrandir des fissures par érosion, et donner comme résultat des tassements locaux (sink holes), des migrations de particules fines à travers les ouvertures plus larges, des renards "piping failures" ou encore des sous-pressions dangereuses. L'existence de lentilles ou de veines de matériaux à granulométrie discontinue peut produire les mêmes effets. Comme indiqué ci-dessus, la pression de sols susceptibles de se rompre

of sliding of the foundation. Tailings dams are often built on hillsides where the combined effect of slurry, water and embankment weight may produce landslides. Fang and Brown<sup>39</sup> and the U.S. Army Corps of Engineers<sup>13</sup> provide methods of analyzing translational and rotational slides.

#### Soil Foundations

The selection of soil strength to be used in the analysis can be a difficult problem and must consider the conditions during construction and operation of the site. The nature of waste disposal is such that a very large quantity of waste can be placed in a relatively short time and the need for this rapid placement is a function of the mining and milling requirements. Foundation materials must be allowed adequate time to consolidate to attain the design strengths. It should be noted that the upstream method of embankment construction requires that the structural part of the embankment be raised over previously placed slimes which act as the foundation for the next dike. Fang<sup>39</sup>, U.S. Army Corps of Engineers<sup>46</sup>, Sherard<sup>33</sup>, and Lambe<sup>21</sup> provide discussions regarding the interpretation of strength test data and the application of total and effective stress analysis. Taylor and D'Appolonia<sup>42</sup> and Walker<sup>43</sup> report test and field data on the performance of two very soft foundations. Earthquake induced liquefaction is discussed in a following seismic section; however, the designer should consider the possibility of liquefaction due to internal movement or strain induced liquefaction whenever loose, saturated sands affect the structure.

#### 3.4.3 Seepage

Since the amount and quality of seepage can have a major effect on the method used for waste disposal, the pollutive and structural effects must be considered early in the design. Theory and use of flownets to determine the quantities, location, forces and pressures due to seepage are presented by Cedergren<sup>22</sup> and Casagrande<sup>47, 48</sup>. An application of finite element analysis to seepage problems is given by Kealy and Williams<sup>49</sup> and Kealy and Busch<sup>50</sup>. Foundation resistance to attack by both water and leachate should be established. Seepage through joints and cracks in rock may dissolve the rock, attack the bonding agent, or increase the size of openings by erosion, and can result in sinkholes, transportation of fine grained particles through the larger openings and piping failures, or serious uplift pressures. The existence of lenses or seams of gap graded materials can have the same effect. As noted earlier, the presence of collapsible soils must be considered early in the design.

(effondrement, éboulis) doit être considérée tôt dans la conception.

Le contrôle de la percolation par les fondations peut nécessiter une des trois méthodes fondamentales suivantes: l'élimination, la réduction ou l'acceptation de la percolation moyennant des dispositifs de contrôle. Le contrôle de la percolation implique d'habitude soit l'une, soit une combinaison des méthodes suivantes: coupure étanche par tranchées ou murs, injections, tapis amont, drains et puits de drainage. Des considérations de conception sont présentées par Sherard<sup>33</sup>, Jansen<sup>34</sup>, USBR<sup>44</sup>, Cedergreen<sup>22</sup>, Thomas<sup>51</sup>, et Koerner et Welsh<sup>52</sup>.

La percolation à travers les barrages de stériles construits par "spigotage" diffère considérablement de la percolation à travers les barrages de retenue d'eau, construits de sol compacté, à cause de sa construction spécifique, géométrie, technologie de mise en place hydraulique et la séparation des stériles dans le remblai. La différence est due à:

- la non-homogénéité dans la direction horizontale, qui a pour effet l'abaissement de la nappe phréatique;
- la non-homogénéité dans la direction verticale, qui tend à remonter le niveau de percolation;
- une grande anisotropie, qui abaisse la nappe phréatique lorsque le débit de percolation débute et la fait monter pendant les phases ultérieures de ce débit de percolation;
- une pente amont sub-horizontale, qui a pour effet d'abaisser la surface de percolation;
- l'infiltration à partir de la plage, qui fait monter la nappe phréatique;
- une plage longue. La nappe phréatique est de beaucoup plus basse que lorsque la plage est plus longue.

Le résultat de tous ces facteurs est que la surface de percolation se trouve de 20% à 50% plus basse que dans le cas de barrages conventionnels.

Une autre particularité des barrages de stériles est que les stériles grossiers n'ont pas de cohésion et sont très susceptibles à l'érosion de l'eau et des percolations. C'est pourquoi la protection des stériles au moyen de filtres à tout endroit où érosion et renards pourraient se produire, exige une grande attention.

#### 3.4.4 Sismicité

Les effets des vibrations causées par des tremblements de terre ou d'autres causes (explosifs par exemple) font l'objet d'une préoccupation croissante. L'application des méthodes pseudo-statiques est acceptée en général dans les zones d'activité sismique relativement faibles. L'application des méthodes dynamiques plus

The control of foundation seepage can follow one of the three basic methods: virtual elimination reduction, or acceptance of the seepage with provisions for control. Seepage control usually involves one or a combination of cutoff trenches or walls, grouting, upstream earth blankets, drains and relief wells. Design considerations and methods are explained by Sherard<sup>33</sup>, Jansen<sup>34</sup>, USBR<sup>44</sup>, Cedergren<sup>22</sup>, Thomas<sup>51</sup>, and Koerner and Welsh<sup>52</sup>.

The seepage through tailings dams constructed by spigotting considerably differs from the seepage through conventional dams, constructed of compacted soil. The difference is due to the following factors which are inherent in a tailings dam and affect the phreatic surface:

- the surface is lowered by non homogeneity in the horizontal direction; by substantial anisotropy at the commencement of seepage flow; by a near horizontal slope to the upstream beach, particularly a long one.
- the surface is raised by non homogeneity in the vertical direction; by substantial anisotropy during the latter phases of seepage flow; and by infiltration from the beach.

As a result of the somewhat compensating action of all these factors, the phreatic surface is from 20 to 50 percent lower than it is with conventional earth dams.

Another peculiarity of the tailings dams is that the coarse tailings are cohesionless and very susceptible to the erosion action of the water and seepage flow. This is why great attention must be paid to the protection of the tailings by filters at any place where erosion and piping could appear.

#### 3.4.4 Seismicity

Increasing attention is being given to the effects of vibration caused by earthquakes or other causes such as explosives. The use of pseudo-static methods of analysis is generally acceptable in areas of relatively low earthquake activity. The use of the more recently developed dynamic methods have, largely because of cost,

récentes a été limitée aux zones de forte activité sismique; du fait principalement de son coût élevé. La nature du produit autant que la méthode de disposition de plusieurs types de stériles forcent à une prise de conscience plus accentuée des effets des tremblements de terre. Le Corps of Engineers<sup>53</sup> a inclu une carte des zones sismiques et une discussion de l'usage des coefficients sismiques. Des cartes sismiques indiquant les fréquences d'occurrence ont également été publiées<sup>54, 55</sup>. De plus, des cartes sismiques du monde entier ont été publiées en Grande Bretagne et en d'autres pays. Un sommaire des tremblements de terre enregistrés et leur description à l'intérieur d'un rayon donné à partir d'un point identifié par des coordonnées peut être obtenu de NOAA<sup>56</sup>. Le choix des coefficients sismiques, les limitations des méthodes pseudo-statiques et l'analyse de la réaction dynamique sont présentés par Seed<sup>39, 40</sup>. Le potentiel de liquéfaction des sols de fondation et en particulier la méthode amont dans laquelle chaque remblai successif est élevé en utilisant comme fondation le matériau humide et fin déposé précédemment, doivent être évalués. Seed et Idriss<sup>57</sup> et Castro<sup>58</sup> fournissent des corrélations entre les résultats des essais de pénétration normalisés (SPT) et le potentiel de liquéfaction. Des rapports choisis parmi de nombreux auteurs<sup>59</sup> fournissent des discussions d'essais et méthodes d'évaluation courantes.

Ellison et Cho<sup>60</sup> font un examen du potentiel de liquéfaction des boues de résidus des mines de charbon. L'ouvrage intitulé Earthquake Engineering and Soil Dynamics<sup>61</sup> contient une discussion approfondie des problèmes de tremblement de terre.

La stabilité des barrages de stériles peut être augmentée et le risque de liquéfaction diminué, grâce aux mesures suivantes:

- l'abaissement de la nappe phréatique; ceci peut être réalisé par tous les moyens de drainage, qu'il s'agisse de barrages d'amorce perméables, de revêtements de drainants ou tapis de drainage;
- le compactage des stériles; si les stériles sont bien compactés à une densité relative plus grande que 0,6, le danger de liquéfaction est très faible. Avec des densités relatives plus grandes que 0,65, il n'y a pratiquement pas de danger de liquéfaction;
- par une recharge sur les matériaux de drainage, (par exemple, les matériaux de décapage de mines à ciel ouvert);
- des zones intermédiaires de matériaux grossiers (tapis drainants) qui séparent en couches le matériau plus fin, humide. Le matériau au-dessus des drains sert de recharge pour celui situé sous le drain et augmente la stabilité contre la liquéfaction;
- l'accélération de la consolidation des stériles; la consolidation rend le matériau plus compact et réduit la teneur en eau, deux facteurs qui rendent le matériau moins susceptible de liquéfaction. La consolidation peut être augmentée de la même façon par toutes sortes de dispositifs de drainage ou des tapis drainants, chargeant et comprimant le sol.

been restricted to zones of high earthquake activity. Both the types of product and the method of disposal of many types of tailings force additional concern over the effect of seismic events. The U.S. Corps of Engineers<sup>53</sup> provides a seismic zone map and a discussion of the use of seismic coefficients. Seismic maps which consider frequency of occurrence have also been published (<sup>54, 55</sup>). In addition, seismic map for the world have been published in Britain and other countries. A summary of recorded earthquakes and descriptions within a specified radius of a site location identified by coordinates can be obtained from NOAA<sup>56</sup>. The selection of seismic coefficients, limitations of pseudo-static methods, and dynamic response analysis is presented by Seed<sup>39, 40</sup>. The potential for liquefaction of foundation soils, and particularly the upstream method where each successive embankment is raised using previously deposited, wet, fine grained materials as a foundation, must be determined. Seed and Idris<sup>57</sup> and Castro<sup>58</sup> provide correlations between standard penetration test results and liquefaction potential. Selected papers by several authors<sup>59</sup> provide discussions of current testing and evaluation methods. Ellison and Cho<sup>60</sup> examine liquefaction potential of coal mine waste slurries. Earthquake Engineering and Soil Dynamics<sup>61</sup> contains extensive discussion of earthquake problems.

Stability of tailings dams can be increased and risk of liquefaction decreased as follows:

- lowering the phreatic surface. This is achieved by all possible means such as drainage, pervious starter dams, drain liners, drain blankets.
- by compacting the tailings; if the tailings are well-compacted to a relative density greater than 0,6, the danger of liquefaction is very small; with relative density greater than 0,65, there is practically no danger of liquefaction,
- overloading drain material (for example, open pit strip material),
- intermediate layers of coarser materials (drain blankets), which separate the finer damp material into layers; then the material above the drains serves as load material for that below the drain and improves stability against liquefaction,
- accelerating the consolidation of the tailings; consolidation makes the material more compact and reduces moisture, two factors that make it less susceptible towards liquefaction; consolidation may be increased by the same measures: all sorts of draining, drain blankets, loading and pressing.

En utilisant tous les matériaux disponibles et en les distribuant judicieusement dans la coupe type du barrage de stériles, (les matériaux perméables drainant toujours les moins perméables), par le jeu d'alternance du cyclonage et du "spigotage", et avec un entretien de plages longues, la stabilité dynamique des barrages de stériles peut être assurée très souvent sans avoir recours à un compactage supplémentaire.

#### 3.4.5 Préparation des fondations et appuis

La préparation minimale des fondations consiste dans l'essartement et l'essouchement en-dessous des parties du barrage, où des vides attribuables à la putréfaction de certains matériaux et où des déformations ne peuvent être tolérés. Étant donné la grande quantité de déchets, l'usage de talus moins raides et de barrages plus larges peut permettre d'éviter le décapage des matériaux de fondation moins désirables. Il serait à recommander que cette première phase de la construction soit sous le contrôle de personnes familières avec les hypothèses de conception. La plupart des conceptions ne permettent pas une deuxième intervention et les travaux de réparation seront plus onéreux et moins satisfaisants que la conception initiale. Les nombreux types possibles de préparation des fondations et des appuis, ainsi que des considérations conceptuelles sont abondamment traités par plusieurs auteurs. USBR<sup>44</sup>, Thomas<sup>51</sup>, Sherard<sup>33</sup>, Cedergreen<sup>22</sup>, D'Appolonia<sup>2</sup>, Jansen<sup>34</sup>, et Halliburton<sup>62</sup> fournissent tous un aperçu des divers problèmes et solutions.



By using all available materials and judiciously distributing them within the cross-section of the tailings dam, (the permeable materials draining the less permeable, by alternate cycloning and spigotting) and with maintenance of long beaches, we can assure the dynamic stability of the tailings dams quite often without the need for additional compaction.

#### 3.4.5 Foundation and Abutment Preparation

Minimal foundation preparations would consist of clearing and grubbing under those parts of the dam where voids, created by rotting material, or movement could not be tolerated. Given a large amount of waste, the use of flatter slopes and wider dams may avoid stripping of less desirable foundation material. It would be advisable that this initial construction phase be under the control of people familiar with the design assumptions. Most designs do not permit a second opportunity and the cost of remedial work will be more expensive and less satisfactory than the original design. The many possible types of foundation and abutment preparation and design consideration are covered by many authors. USBR<sup>44</sup>, Thomas<sup>51</sup>, Sherard<sup>33</sup>, Cedergren<sup>22</sup>, D'Appolonia<sup>2</sup>, Jansen<sup>34</sup>, and Halliburton<sup>62</sup> all provide insight into the various problems and solutions.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal. Papers collected by the Committee on Embankment Dams and Slopes of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979.
2. Engineering and Design Manual, Coal Refuse Disposal Facility. E. D'Appolonia Consulting Engineers. Superintendent of Documents; Washington, D.C.; Mining Enforcement and Safety Administration (MESA).
3. Uranium Mill Tailings Management, Proceedings of a Symposium, Colorado State University, 1978.
4. Tailings Disposal Today, Proceedings of the First International Tailing Symposium, Tucson, Arizona, 1972, Edited by C.L. Alpin and G.O. Argall, Jr., Miller Freeman Publications Inc., San Francisco, California.
5. Tailings Disposal Today, Proceedings of the Second International Tailing Symposium, Denver, Colorado, 1978, Edited by G.O. Argall, Jr., Miller Freeman Publications Inc., San Francisco, California.
6. Buffalo Creek (W.Va.) Disaster, 1972, Hearing Before the Subcommittee on Labour of the Committee on Labour and Public Welfare, United States Senate, Ninety-Second Congress, Second Session on Buffalo Creek Disaster, Part 1 & 2, 1972.
7. Williams, R.E., Waste Production and Disposal, 964, Miller Freeman Publications.
8. Chow, Ven Te., Handbook of Applied Hydrology, 1964, McGraw Hill.
9. SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, 1972. For sale by Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
10. Design of Gravity Dams, Appendix G. Inflow Design Flood Studies, 1976, U.S. Department of the Interior-Bureau of Reclamation.

11. Design of Small Dams, 1974. Department of the Interior U.S.-  
Bureau of Reclamation.
12. Recommended Guidelines for the Safety Inspection of Dams, U.S.  
Army Corps of Engineers.
13. Chow, Ven Te., Open Channel Hydraulics, 1959, McGraw Hill.
14. Brater, F.E. and H.E. King, Handbook of Hydraulics, 6th Ed., 1976,  
McGraw Hill.
15. Abadjiev Ch.B. and A.A. Karadimov, About the Application  
Conditions of the Spigotted Tailings Dam and the Upstream Method,  
Rudodobiv, 1, 1980, Sofia.
16. Abadjiev Ch.B. and A.A. Karadimov, Construction and Height of the  
Starter Dams of the Spigotted Tailings Dams Built by the Upstream  
Method, Rudodobiv, 3, 1980, Sofia.
17. Abadjiev Ch.B., A.A. Karadimov, and P.B. Korenev. Some Research  
and Considerations for the Design of Tailings Dams Built by  
Cyclones and the Downstream Method, Rudidobiv, 11, 1980, Sofia.
18. ASTM Standard Methods for Moisture-Density Relations of Soils  
Using 5.5 lb (2.5 kg) Rammer and 12-in. (304.8 mm) Drop. D698-70  
in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building  
Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 145-149.
19. ASTM Standard Methods for Moisture-Density Relations of Soils  
Using 10 lb (4.5 kg) Rammer and 18-in (457 mm) Drop. D1557-70 in  
1976 Annual Book of ASTM Standards: part 19, Natural Building  
Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 211-216.
20. Hall, H.W. Soil Compaction Investigation Report No. 10 U.S. Army  
Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.,  
1968, 13 pp.
21. Lambe, T.W. and R.V. Whitman, Soil Mechanics. John Wiley & Sons  
Inc., New York, 1969, 165 pp.
22. Cedergreen, H.R., Seepage, Drainage and Flow Nets. John Wiley &  
Sons Inc., New York, 1967, 467 pp.
23. Soderberg, Roy L. and Richard A. Busch, Design Guide Metal and  
Nonmetal Tailings Disposal, BuMines RI 8755, 1977. 136 pp.

24. Coates, D.F. Tentative Design Guide for Mine Waste Embankments in Canada. Can. Dept. Energy, Mines and Resources, Mines Branch Mining Research Center, Tech. Bull. TB 145, March 1972, 1989 pp.
25. Bishop, A.W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes. Geotechnique, v. 5, No. 1, 1965, pp. 7-17.
26. Morgenstern, N.R., and V.E. Price. The Analysis of the Stability of General Slip Surface. Geotechnique, V. 15, June 1965, pp. 79-93.
27. Whitman, R.V. and W.A. Bailey. Use of Computers for Slope Stability Analysis, J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE. v. 93, No. SM4, July 1967, pp. 475-498.
28. ASTM Standard Methods for Unconsolidated, Undrained Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression, D2850-70 in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 348-353.
29. Hvorslev, M.J. Subsurface Exploration and Sampling of Soil for Civil Engineering Purposes. U.S. Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1949, p. 2.
30. U.S. Army Corps of Engineers. Laboratory Soils Testing. Em 1110-2-1906 in 1952 Soil Mechanics Design, 1952, 62 pp.
31. Kealy, C.D. and R.A. Busch. Determining Seepage Characteristics of Mill Tailings by the Finite Element Method. Published as U.S. Bureau of Mines Report of Investigation No. 7477.
32. Kealy, C.D., R.A. Busch and M.M. McDonald. Seepage-Environmental Analysis of the Slime Zone of a Tailings Pond. BuMines Ri 7939, 1974, 89 pp.
33. Sherard, J.L., R.J. Woodward, S.F. Gilzienski, and W.A. Clevenger. Earth and Earth-Rock Dams. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1963, 671 pp.
34. Jansen, R.B., Dams and Public Safety. Superintendent of Documents. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402; and the Water and Power Resources Service, Engineering and Research Center, Denver Federal Center, Post Office Box 25007, Denver, Colorado 80225, Attention: 922, Stock No. 24-003-00138-4.

35. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines. Criteria for Determining When a Body of Surface Water Constitutes a Hazard to Mining. Prepared by Engineers International, Inc., available through National Technical Information Service (NTIS).
36. U.S. Bureau of Mines, Guidelines for Mining Near Water Bodies. Prepared by Skelly and Lo, available through NTIS.
37. U.S. Bureau of Mines, Contract No. 252021. Guidelines for Mining Under Surface Water. Prepared by K. Wardell and Partners, available through NTIS.
38. Terzaghi, K. and R. Peck. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons. Inc., New York, 1967, 729 pp.
39. Foundation Engineering Handbook. Edited by H.F. Winterkorn and H. Farg; Van Nostrand's Rheinhold Company.
40. Rutledge, P.C. and J.P. Gould. Embankment Dam Engineering; Casagrande Volume; chapter titled "Movements of Articulated Conduits Under Earth Dams on Compressible Foundations".
41. Blinde, A., Earth and Water Pressure on Rectangular Conduit Embedded in Settling Pond Dam, pp. 296-316; Tailing Disposal Today, Miller Freeman Publications, 1973.
42. Taylor, M.J. and E. D'Appolonia. Integrated Solutions of Tailings Disposal. Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials; ASCE/Ann Arbor, Michigan/ June 13-15, 1977.
43. Walker, F.C., Willard Dam - Behaviour of a Compressible Foundation. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division; Proceedings of ASCE, Vol. 93, No. SM4; July 1967.
44. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. 1st. ed. 1960 (3rd printing, 1965), 595 pp.
45. U.S. Bureau of Reclamation, Earth Manual; 2nd Ed. For sale by Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
46. U.S. Department of the Army; Corps of Engineers. Engineering and Design, Stability of Earth and Rockfill Dams. EM 1110-2-1902.

47. Casagrande, A.W. Research on the Atterberg Limits of Soils. Public Roads, v 13, October 1932, pp. 121-136.
48. Casagrande, L. and B.N. MacIver. Design and Construction of Tailings Dams. Proceeding 1st International Conference on Stability of Open Pit Mining, Vancouver, British Columbia, Nov. 23-25, 1970. Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1971, pp. 181-204.
49. Kealy, C.D. and R.E. Williams. Flow Through a Tailings Pond Embankment. Water Resources, Vol. 7, No. 1, pp. 143-154.
50. Kealy, C.D. and R.A. Busch. Determining Seepage Characteristics of Mill Tailings by the Finite Element Method. Published as U.S. Bureau of Mines Report of Investigation No. 7477.
51. Thomas, H.H. Engineering of Large Dams. John Wiley & Sons.
52. Koerner, R.M. and J.P. Welsh. Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetic Fabrics. John Wiley & Sons; 1980.
53. U.S. Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers. Recommended Guidelines for Safety Inspection of Dams. Washington, D.C. 20314.
54. Effective Peak Acceleration Map; published by California Applied Technology Council, printed in Civil Engineering Magazine; December 1976.
55. Algermission, S.T. and D.M. Perkins. Earthquake Hazard Map of the United States; U.S. Geological Survey; Denver, Colorado.
56. National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Data and Information Service, Att: D622; 325 Broadway; Boulder, Colorado 80303.
57. Seed, H.B. and I.M. Idriss. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential.
58. ASCE Journal of the Geotechnical Division. Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands; Castro, G., June 1975.
59. Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering. ASCE Annual Convention and Exposition. Philadelphia, Pa., September 1976, Preprint 2752.

60. Ellison, R.D. and Yo Y. Cho. Liquefaction Considerations for Fine Coal Refuse. D'Appolonia Consulting Engineers. Paper presented to 7th Ohio River Valley Soil Seminar; Lexington, Ky. October 8, 1976.
61. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 1, 2 and 3. Proceedings of ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, 1978. Published by American Society of Civil Engineers.
62. Halliburton. Grouting in Soil, Design and Operating Manual; Vol. 2. June 1976. Available from National Technical Information Service No. PB-259044.
63. Abadjiev Ch.B., Seepage through mill tailings dams, Questi 44, Report 18, XII International Congress on Large Dams, Mexico 1976.
64. American Society for Testing and Materials. Standard Methods for Particle-Size Analysis of Soils. D4220-63 (1972) in 1976 Annual Book of ASTM Standards: part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 69-79.
65. ASTM Standard Methods of Test for Liquid Limit of Soils. D423-66 (1972) in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 80-83.
66. ASTM Standard Methods of Test for Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. 424-59 (1971) in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones, Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 84-85.
67. ASTM Standard Methods of Test for Specific Gravity of Soils. B854-58 in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 154-156.
68. ASTM Standard Methods for Density of Soil in Place by the Sand Cone Method. D1556-64 (1974) in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 207-210.
69. ASTM Standard Methods of Density of Soil in Place by the Rubber Balloon Method. D2167-66 in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 267-270.

70. ASTM Standard Methods for One Dimensional Consolidation Properties of Soils. D2435-70 in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 305-308.
71. ASTM Standard Methods of Denity of Soil and Soil-Aggregate in place by Nuclear Methods (Shallow Depth). D2922-71 in 1976 Annual Book of ASTM Standards: Part 19, Natural Building Stones; Soil and Rock. Philadelphia, Pa., 1976, pp. 357-364.
72. Debry, R. and L. Alvarez. Seismic Failure of Chilean Tailings Dams. J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, V. 93, No. SM6, November 1967, pp. 237-260.
73. Goodman, R.E. and H.B. Seed. Earthquake Induces Displacement in Sand Embankments. J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, v. 92, No. SM2, March 1965, pp. 125-146.
74. Ham, R.W., L.L. Weiss and W.T. Wilson, Isolation as an Empirical Function of Daily Sunshine Duration. Monthly Weather Rev., v. 82, No. 6, June 1954, pp. 141-146.
76. Hoeck, E. Der Einfluss der strahlung und der temperature auf den Schmelzprozess der Schnee decke (Influence of Radiation and Temperature on the Melting Process of the Snow Cover). Beitrage zurgeoloci der Schweiz, Geotechnische serie Hydrologie, v. 8, 1952; U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, SIPRE Translation 49, January 1958.
77. Hough, B.K. Basic Soils Engineering. Ronald Press Co., New York, 1957, pp. 97-134.
78. Iliev S.S. Nikolov and G. Avramov, Experience from the construction of dams for tailing dumps in the People's Republic of Bulgaria. Question 44, Report 17, XII International Congress on Large Dams, Mexico, 1976.
79. Kelay, C.D. and R.L. Soderberg. Design of Dams for Mill Tailings. BuMines IC 8410, 1969, 44 pp.
80. Kealy, C.D. Safe Design for Metal Tailings Dams. Min. Cong. J., v. 59, No. 1, January 1973, pp. 51-55.
81. Li, C.Y. Construction Pore Pressures in an Earth Dam. J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, v. 85, No. SM5, October 1959, pp. 43-59.



82. MacIver, B.N. How the Soils Engineer Can Help the Mill Man in Construction of Proper Tailings Dams. Eng. and Min. J., v. 162, No. 5, May 1961, pp. 85-90.
83. Melentiev V.A., N.P. Kolpashnikov and B.A. Volnin, Hydraulically filled hydraulic structures, Ed. "Energy", Moscow, 1973 (in Russian).
84. Parcher, J. and R. Means. Soil Mechanics and Foundations. Charles E. Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio, 1968, 543 pp.
85. Rainfall Frequency - Duration Atlases, Various Publication dates for different areas and storms. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau.
86. U.S. Army Corps of Engineers - Runoff from Snowmelt. EM 1110-2-1406 in 1960 Engineering and Design, 1960, 61 pp.
87. Seed, H.B. A Method of Earthquake Resistant Design of Earth Dams. J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, v. 9, No. SM1, January 1966, pp. 13-41.
88. Seed, H. and K.L. Lee. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, v. 92, No. SM6, November 1966, pp. 105-134.
89. Smith, E.S. Tailings Disposal and Liquefaction. Trans. AIME, v. 244, 1969, pp. 179-187.
90. Taylor, R.L. and C.B. Brown, Darcy's Flow Solutions with a free Surface. ASCF, Hydraulics Div., v. 93, No. 42, March 1967, pp. 25-33.
91. Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1963, pp. 1-182.
92. Terzaghi, K. and R.B. Peck. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Ed.; John Wiley & Sons.
93. U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation. Design of Small Dams, 2nd Ed. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
94. U.S. Army Corps of Engineers. Design of Finite Relief Well Systems. EM 1110-2-1905, 1963, 47 pp.

95. Wahler, W.A. and Associates, Evaluation of Mill Tailings Disposal Practices and Potential Dam Stability Problems in Southwestern United States, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.
96. Taylor, M.J. and Antommaria, P.E. "Immobilization of Radionuclides at Uranium Tailings Disposal Sites" - Uranium Mill Tailings Management - Colorado State University - Vol. II (1971).
97. Guarnaschelli, C and Shields, D.M. - Comments on Physical-Chemical Approach to Uranium Mill Tailings Disposal" - Uranium Mill Tailings Management - Colorado State University - Vol. II (1978)



## 4. CONSTRUCTION ET EXPLOITATION

### 4.1 Introduction

Il n'est pas dans l'esprit de ces notes d'établir des techniques détaillées d'installation, de manutention et d'exploitation de l'équipement, ou de mise en place proprement dite des stériles, les nombreuses méthodes constructives des barrages de stériles variant considérablement d'un site à un autre et d'un pays à l'autre. On ne s'attachera dans ce chapitre qu'à la discussion des aspects généraux de la construction de ces barrages. Par la suite, les exigences constructives des divers travaux préalables à la mise en place des stériles seront discutées, suivies d'un examen des objectifs et faiblesses des modes de déposition, de même que des techniques de surveillance et entretien. En dernier lieu, quelques notes seront présentées en ce qui concerne les mesures correctives.

### 4.2 Description des techniques de mise en place

#### 4.2.1 Généralités

L'objectif premier dans la construction de tout barrage de stériles est de disposer des rebuts de la manière la plus efficace, la plus sûre et la plus économique dans les conditions imposées.

Un barrage de stériles comporte généralement la mise en place de matériaux de rebut selon une méthode ordonnée et planifiée de manière à constituer un dépôt stable à long terme. Comme il s'agit aussi généralement d'opérations continues sur des périodes de 24 heures, il est nécessaire de planifier à l'avance et d'avoir un plan spécifique d'exploitation compatible avec les exigences conceptuelles d'un barrage. La philosophie de la conception doit être entièrement comprise dans son essence et la méthode de mise en place doit être telle que les exigences conceptuelles futures pourront être satisfaites et que ces exigences pourront être réalisées durant la phase de mise en place.

##### 4.2.1.1 Mise en place - technique amont

Dans cette technique l'axe du dépôt se déplace progressivement vers l'amont depuis le pied aval vers le centre du barrage à mesure que celui-ci s'élève. Si la proportion de sables grossiers est peu élevée, il en résultera pour le dépôt un appui extérieur de faible ampleur, formé de matériaux à haute résistance.

##### 4.2.1.2 Mise en place - technique aval

Cette technique permet la réalisation d'un dépôt de matériaux de haute résistance fortement ancrés, en commençant par un remblai

## 4. CONSTRUCTION AND OPERATION

### 4.1 Introduction

These notes do not attempt to set out detailed techniques for the installation, handling and operation of equipment and the actual placing of tailings for the many different tailings dam construction methods which vary considerably at individual locations and from country to country. Only general aspects of tailings dam construction will be discussed. Thereafter, construction requirements for various pre-deposition works will be described, followed by a discussion on deposition objectives and pitfalls, and deposition monitoring and maintenance requirements. Finally, some notes on remedial measures are presented.

### 4.2 Description of Tailings Deposition Techniques

#### 4.2.1 General

The basic objective in construction of any tailings dam is to dispose of the waste tailings in the most efficient, safe and economical way for the conditions applying.

A tailings dam generally involves the placement of tailings material in an orderly and planned fashion so as to form a stable deposit of the tailings in the long term. As it is generally a continuous 24-hour day operation it is necessary to plan ahead and to have a specific plan of operation which is consistent with the design requirements of the dam. The philosophy of design must be fully understood and the deposition planning must be such as to anticipate the design requirements in the future and to ensure that these are achievable during the deposition phase.

##### 4.2.1.1 Deposition by Upstream Technique

This method is one in which the crest of the dam moves progressively upstream as the impoundment is raised. If the proportion of coarse sand sizes in the tailings is small it results in a rather insubstantial outer shell of high strength material for the impoundment.

##### 4.2.1.2 Deposition by Downstream Technique

In this technique the crest of the dam wall moves progressively downstream as the impoundment is raised thus providing a substan-

d'amorce situé à l'intérieur du périmètre de pied du barrage et par la mise en place à partir du remblai d'amorce progressivement vers l'amont et vers l'extérieur. L'axe du dépôt se déplace ainsi vers le remblai d'amorce extérieur à mesure que le barrage s'élève.

#### 4.2.1.3 Mise en place - technique de l'axe central

Selon cette technique l'axe du dépôt reste dans une position fixe relativement au remblai d'amorce, à mesure que monte le niveau du dépôt.

#### 4.2.2 Construction par cyclonage

##### 4.2.2.1 Objectifs du cyclonage

L'hydrocyclone permet de diviser la boue de stériles selon deux composantes:

- le débit de fond contenant des éléments gros et une faible teneur en eau;
- le débit de surface contenant des éléments fins et la proportion d'eau la plus forte.

La figure 4-1 présente une définition du bilan eau - solides pour un hydrocyclone. Le débit de fond d'un hydrocyclone possède généralement de bonnes caractéristiques de cisaillement, avec des propriétés drainantes relativement bonnes pouvant former un cône lorsque déchargé par un hydrocyclone, si la performance de ce dernier est soigneusement conçue et surveillée.

Le débit de surface, quant à lui, est une boue possédant une faible perméabilité et de bonnes caractéristiques d'écoulement.

Le but d'un hydrocyclone dans la construction de barrages de stériles est de mettre en place la composante de fond de manière à créer un dépôt servant à contenir la composante de surface au cours de chaque phase de la vie de l'aire de dépôt.

##### 4.2.2.2 Techniques de cyclonage et leur contrôle

La construction de l'appui extérieur d'un barrage de stériles selon les techniques de mise en place implique un déplacement logique du cyclone à gros éléments au long de la périphérie du barrage de stériles formant un dépôt. Le débit de décantation est déchargé dans la cuvette ainsi créée.

Pendant la phase de conception un procédé de mise en dépôt aura été développé, procédé qui permettra d'assurer l'accroissement de l'appui toujours en avance de la plage d'éléments fins en arrière de l'appui. Ceci suppose que l'on dispose de matériaux suffisants pour construire l'appui et que les propriétés géotechniques de ce matériau de décantation seront structurellement adéquates. Les

tial "full wedge" impoundment of high strength material and is achieved by starting deposition at a starter wall which is a distance inside the perimeter toe wall of the dam and by depositing material from the starter wall position successively upwards and outwards towards the toe wall. The centre line of the impoundment thus moves outwards towards the outer toe wall of the dam as it rises.

#### 4.2.1.3 Deposition by Centreline Technique

This method is one in which the crest of the dam remains in a constant position in plan with respect to the toe wall as the level of the impoundment rises.

#### 4.2.2 Wall Building by Cyclone Deposition (Description of techniques)

##### 4.2.2.1 Cycloning Objectives

A hydrocyclone splits incoming tailings slurry into two components, namely:

- the cyclone underflow which contains the coarser particles and a reduced water content; and
- the cyclone overflow which contains the finer particles and most of the water.

A definition sketch and water/solids balance for a cyclone is shown in Fig. 4-1.

The cyclone underflow product generally has good shear strength properties, is relatively free draining and will form a cone upon discharge from the cyclone, providing the cyclone performance is carefully designed and monitored.

The cyclone overflow product is a wet slurry which has a low permeability and good flow characteristics.

The objective in using a hydrocyclone for tailings dam construction is to place the underflow product in such a way as to create an impoundment for the containment of the overflow product at all stages of the life of the disposal area.

##### 4.2.2.2 Cyclone Deposition Techniques and Their Control

The building of the outer wall of a tailings dam by cyclone deposition technique involves a logical progression of placement of the coarse cyclone on the outer periphery of the tailings dam to form the impoundment. The fine overflow is discharged into the pool area.

During the design phase a procedure for deposition would have been evolved which would ensure that the growth of the wall will at all times keep ahead of the growth of the fines beach infill behind the wall. This assumes that sufficient underflow material will be available to build the wall and that the geotechnical properties of this underflow material will be structurally adequate. The

FIG. 4-1

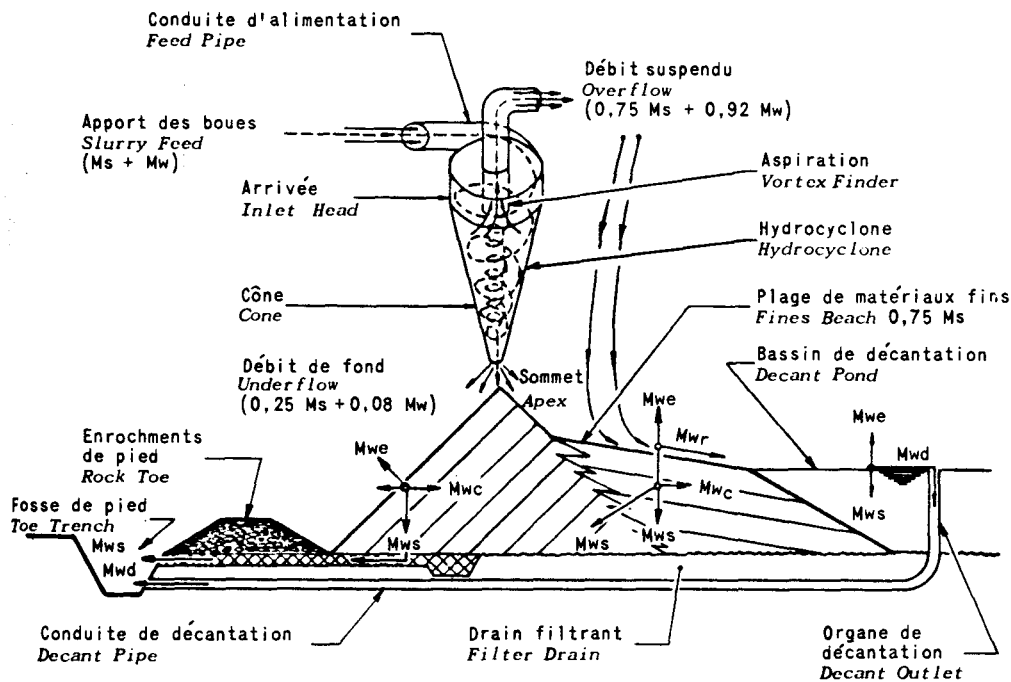
Bilan hydrique type d'une exploitation hydrocyclone/barrage de stériles  
(eau du procédé seulement)  
*Typical cyclone & Tailings dam water balance (Process water only)*

M<sub>s</sub> = Solides = *Mass of Solids*  
M<sub>w</sub> = Eau = *Mass of Water*  
M<sub>w<sub>e</sub></sub> = Perte par évaporation = *Evaporation Loss*  
M<sub>w<sub>s</sub></sub> = Perte par percolation = *Seepage Loss*  
M<sub>w<sub>c</sub></sub> = Eau capillaire = *Pore water*  
M<sub>w<sub>r</sub></sub> = Eau de ruissellement = *Runoff Water*  
M<sub>w<sub>d</sub></sub> = Eau de décantation = *Decanted Water*

stériles sont déposés dans une certaine séquence en appliquant les techniques aval, amont, axe central ou encore amont/aval. Il faut s'assurer que ces séquences seront respectées à moins que les rapports n'indiquent la nécessité d'un écart du plan conceptuel pour satisfaire les conditions du site. Il est essentiel de maintenir des rapports réguliers de la performance de l'hydrocyclone pendant la phase de mise en dépôt des stériles. Les points saillants des rapports devront être:

- a) Fractionnement du matériau selon ses composantes.
- b) La qualité du produit de fond en ce qui concerne la séparation des éléments particulièrement à la valeur D10 qui influence la perméabilité de ce matériau. Il est essentiel que la composante de fond soit perméable et que la quantité du matériau D10 soit en relation directe avec la perméabilité du matériau.
- c) Densité de la boue de fond. A moins du maintien d'une densité constante, le matériau de fond ne formera pas un appui aux pentes désirées. Si trop humide, il en résultera un tas humide et désordonné. Si trop sec, il en résultera un tas aux pentes trop raides et instables.
- d) La densité du produit de cyclonage mesurée in-situ doit être échantillonnée et mesurée afin de s'assurer que les rapports tonnage/volume admis lors de la conception initiale sont respectés.





tailings are deposited in a certain sequence using either the downstream, upstream, centreline or upstream/downstream placement techniques. It must be ensured that these sequences are adhered to unless records show that a variation from the design plan is required to meet conditions applying on site. It is essential that regular records of the cyclone performance are taken during the deposition phase of the tailings dam, the most important of which are:

- a) Split of material to the flow.
- b) Quality of the underflow product with respect to size separation and in particular the D10 size which affects the permeability of this material. It is essential that the underflow material be permeable and the amount of D10 material have a direct relationship to the permeability of the material. It must form a suitable filter for the slurry.
- c) Density of the underflow slurry. Unless a consistent density is maintained, the underflow material will not form a wall at the required slopes. If it is too wet, a wet sloppy heap will form and if it is too dry a steep, unstable pile of material will build up.
- d) The in-situ density of the cyclone product should be sampled and measured to ensure that original design tonnage/ volume assumptions were correct.

- e) Des essais de perméabilité in-situ doivent également être réalisés pour vérifier que le matériau possède les propriétés désirées.

La performance des hydrocyclones telle que relevée au moyen des essais ci-dessus constitue une partie essentielle de la réussite de cette technique de construction. Des écarts dans la performance d'un hydrocyclone sont dûs en général à des pressions d'apport inadéquates ou à des robinets (vortex finders or apexes) usés. Des règles bien élaborées d'entretien doivent être observées afin de veiller au remplacement ou entretien réguliers de ces derniers.

Par observation d'heure en heure de la fraction de fond, on s'assurera qu'aucun mauvais fonctionnement de l'hydrocyclone n'a lieu. Il devient rapidement possible de reconnaître tout écart du produit de fond. Un produit trop humide causera l'érosion du matériau déposé précédemment, alors qu'un matériau trop sec causera un dépôt de pentes non acceptables. En général, la fraction de fond devrait être traitée par décharge atomisée (spray discharge), en opposition à une décharge à pleine section, (rope discharge), pour un meilleur rendement de l'hydrocyclone et une meilleure séparation des fractions. En général, la technique de mise en place par hydrocyclone requiert de temps en temps la levée et le nouveau positionnement des boyaux d'apport à mesure que la hauteur de l'appui augmente. Ceci se fait par sections, pendant que d'autres zones du barrage continuent à fonctionner et à recevoir des stériles. Une autre façon de procéder consiste à déplacer les lignes d'apport pendant que ces dernières déchargent librement le matériau dans le réservoir. En procédant à l'un de ces déplacements, il faut veiller à ce que la retenue créée par l'appui formé de gros éléments ne soit indûment remplie.

Il faut souligner que la cadence de montée de la plage d'apports relativement à la cadence de l'appui à gros éléments doit être surveillée pour que l'accroissement de l'appui soit toujours en avance sur les niveaux de la plage. S'il est constaté que la plage monte trop rapidement relativement à l'appui, il faut procéder à une révision des hypothèses de base. Ceci pourrait se produire, par exemple, si l'hydrocyclone donnait une proportion plus faible d'éléments gros ou si la densité in-situ était inférieure à la valeur admise durant la conception.

En règle générale, la technique de mise en place par cyclonage exige une performance consistante des hydrocyclones et leur déplacement logiquement planifié, afin de réaliser une mise en place telle que désirée, ayant toujours à l'esprit que le but principal est de maintenir le niveau de l'appui à gros éléments en avance sur le niveau de la plage tout en assurant en même temps la stabilité de la structure.

#### 4.2.2.3 Cyclonage par la méthode amont

Dans cette méthode la ligne d'apport de la boue est placée initialement sur l'appui d'amorce du barrage et les dépôts de fond sont déposés du côté intérieur de l'appui de pied (c'est-à-dire à l'amont de la ligne d'apport) et en partie au-dessus de la plage qui se forme en même temps. La Fig. 4-2 illustre cette méthode.

- e) Similarly, in-situ permeability tests should be undertaken to ensure that the material has the correct properties.

Cyclone performance, as monitored by these tests, is an essential part of the success of this wall building technique. Variations of cyclone performance are usually due to either inadequate feed pressure or worn vortex finders or apexes of the cyclone. Careful maintenance procedures must be followed to ensure that these are regularly replaced and maintained.

Visual inspection of the cyclone underflow product must take place hourly to ensure that gross malfunctioning of the cyclone is not taking place. In a short time it becomes possible to recognise any variations from the correct cyclone underflow product. Too wet a product will cause erosion of previously deposited material and too dry a product will cause an unacceptably steep deposition. Generally, the cyclone underflow should be operated with a spray discharge (as opposed to a rope discharge) as better cyclone efficiency and split is achieved in this mode of operation. The cyclone deposition technique generally involves lifting and re-positioning the feed pipelines from time to time as the wall grows in height. This must generally be done in sections while other areas of the dam continue to operate and receive tailings. Alternatively the pipe moves can be made while material is discharged into the storage basin of the dam by open-ended procedures. If such a move is made, care must be taken so as not to unduly fill up the storage created by the coarse wall impoundment.

It is stressed that the rate of rise of the beach infill with respect to the rate of rise of the coarse wall must be monitored to ensure that the coarse wall always stays consistently above the beach level. Should it be found that the beach rise is too fast with respect to the wall growth, a re-assessment of the design assumptions must be made. As an example, this could be caused by a smaller split to the underflow being achieved from the cyclones or by the beach in-situ density being lower than assumed in the design phase.

In general, the cyclone deposition technique relies heavily on consistent cyclone performance and on the logical and planned movement of cyclones so as to achieve deposition of tailings in the desired manner, always bearing in mind the main objective is to keep the coarse wall level ahead of the beach level while, at the same time, maintaining a stable structure.

#### 4.2.2.3 Cycloning by Upstream Method

In this technique the slurry delivery pipe would initially be placed on the toe wall of the dam and the cyclone underflow deposits placed inside the toe wall (i.e. upstream from the delivery pipe) and partially on top of the fines beach which develops at the same time. Fig. 4-2 illustrates this method.

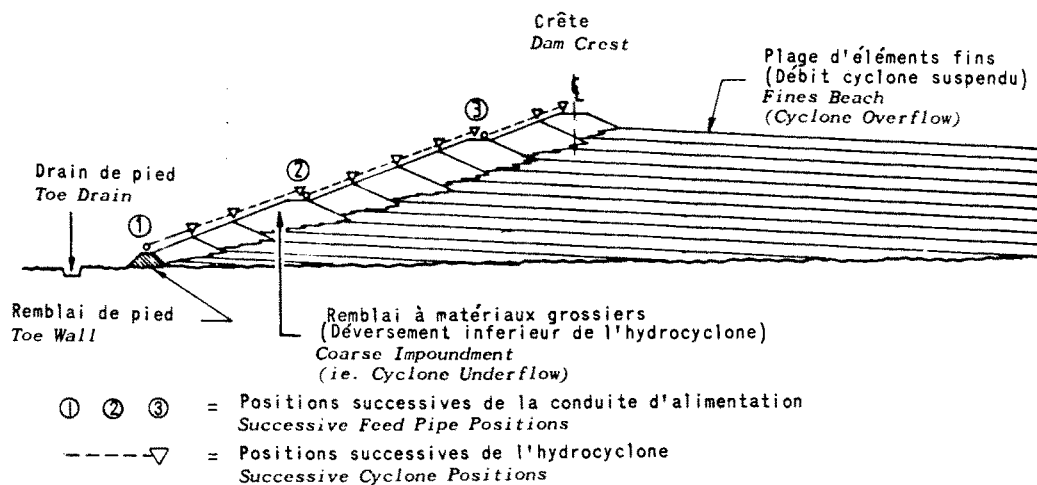


FIG. 4-2  
Cyclonage par la méthode amont  
Cycloning by upstream method

#### 4.2.2.4 Cyclonage par la méthode aval

En ce cas-ci la ligne d'apport est placée sur l'appui de division intérieur, et le matériau de fond est déposé dans la zone située entre les appuis d'amorce et de pied (c'est-à-dire à l'aval de la ligne d'apport). L'appui d'amorce agit initialement comme une digue d'emmagasinement pour les éléments fins, permettant ainsi le développement d'un dépôt jusqu'à un niveau tel qu'une aire de mise en place adéquate pourra se former pour contenir adéquatement la plage de fins et la cuvette. La Fig. 4-3 illustre la méthode.

#### 4.2.2.5 Cyclonage par séquences successives amont et aval

Cette technique en est une qui permet la mise en dépôt d'un appui d'emmagasinement constitué de stériles à haute résistance en une série de séquences amont et aval, conçues de manière à utiliser une quantité limitée du matériau gros déchargé à partir du débit de fond, c'est-à-dire dans le cas où il y a un manque de matériau pour une séquence complète de construction par la technique aval, mais où il y a suffisance de matériau pour créer un appui partiel de gros éléments (partial wedge) au lieu d'employer la technique amont qui n'arrive pas à satisfaire les exigences. La Fig. 4-4 illustre la technique.

#### 4.2.2.6 Cyclonage par le centre

Dans l'application de cette technique, la ligne d'apport et les hydrocyclones sont positionnés au long de l'axe du dépôt final et demeurent dans cette même position relative pendant toute la période de construction en les surélevant verticalement. Habituellement, ceci ne peut être réalisé que par l'emploi de portiques

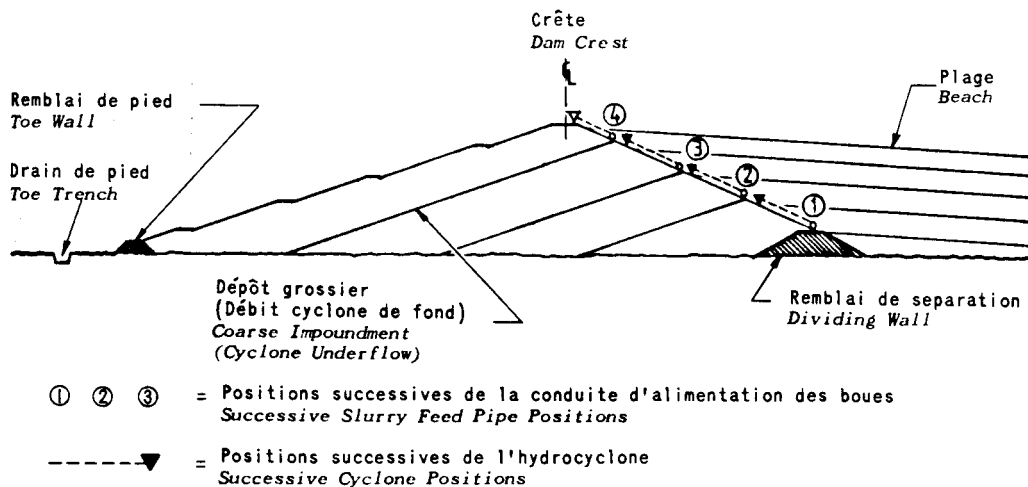


FIG. 4-3  
Cyclonage par la méthode aval  
Cycloning by downstream method

#### 4.2.2.4 Cycloning by Downstream Method

Here the slurry delivery pipeline is placed on the internal dividing wall, and cyclone underflow material is placed in the area between the starter and toe walls (i.e. downstream from the delivery pipe). The starter wall initially acts as a storage dam for fines, thus allowing the coarse tailings deposits to develop to a stage where they can form an adequate impoundment for confinement of the fines beach and pool.

Fig. 4-3 illustrates this method.

#### 4.2.2.5 Cycloning by Successive Upstream and Downstream Sequences

This technique is one in which a satisfactory outer impoundment shell of coarse high strength tailings is deposited in a series of successive upstream and downstream sequences, so planned as to make use of a limited amount of coarse material being discharged from the cyclone underflow, i.e. in the case where there is insufficient material for a full downstream construction sequence but where there is sufficient to create a partial wedge of coarse material, rather than by employing the rather unsatisfactory upstream technique. This method is illustrated in Figure 4-4.

#### 4.2.2.6 Cycloning by Centre Line Deposition

In this technique the slurry delivery pipe and cyclones are positioned on the centre line of the ultimate impoundment wall and they remain in the same relative position throughout construction by raising them vertically. This can usually only be achieved by the use of gantries to support the tailings delivery pipe and the

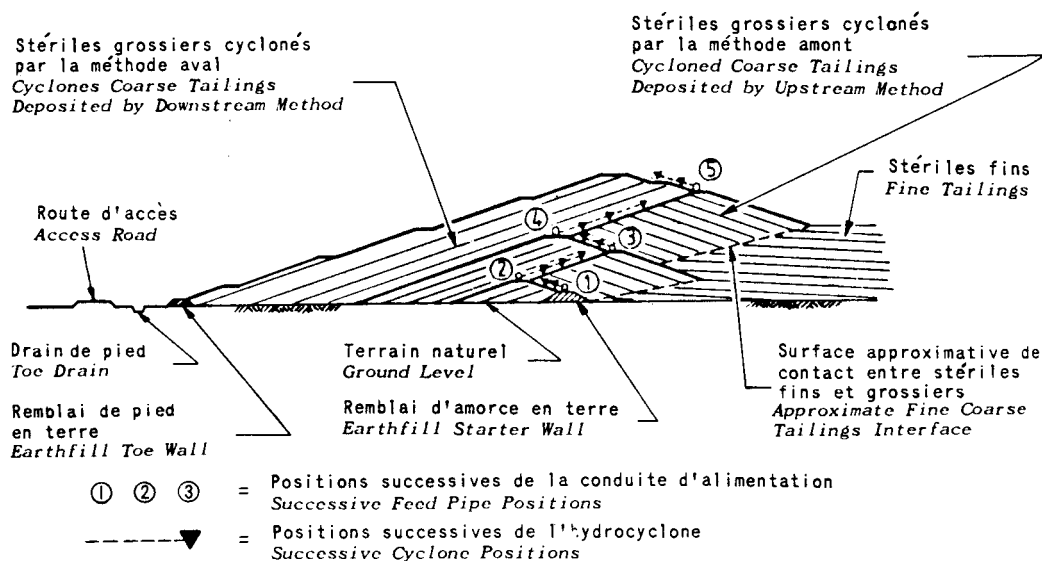


FIG. 44

Cyclonage par dépôts successifs amont et aval  
Cycloning by successive upstream & downstream deposition

supportant la ligne d'apport et les hydrocyclones et permettant leur déplacement vertical vers le haut sans les enterrer dans le matériau déposé. La Fig. 4-5 illustre la méthode.

#### 4.2.2.7 Méthodes de cyclonage ponctuel

Cette méthode sert à diviser l'apport de boue en deux fractions, les éléments fins et les éléments gros, à un point central situé au voisinage du barrage de stériles, contrairement aux techniques précédentes lesquelles maintiennent le procédé de séparation sur le massif de stériles à mesure qu'il prend de l'ampleur. Le gros matériau est alors mis en place hydrauliquement ou mécaniquement.

#### 4.2.3 Méthodes de mise en place par jets multiples (spigots)

Les "spigots" sont des exutoires multiples au long d'une ligne d'apport. Les "spigots" sont utilisés lorsqu'il est possible et souhaitable de produire un fractionnement gradué entre les fractions d'éléments gros et d'éléments fins des stériles. Les "spigots" fractionnent le débit de stériles en de plus faibles débits, permettant ainsi une chute rapide de la vitesse de courant. Cette chute de vitesse permet aux fractions d'éléments grossiers de se déposer promptement. La grosseur des éléments décroît avec la distance depuis le "spigot" et seule la fraction d'éléments fins atteint la cuvette. Des spigots en nombre suffisant sont ouverts à chaque instant pour subvenir aux besoins du débit total d'apport.

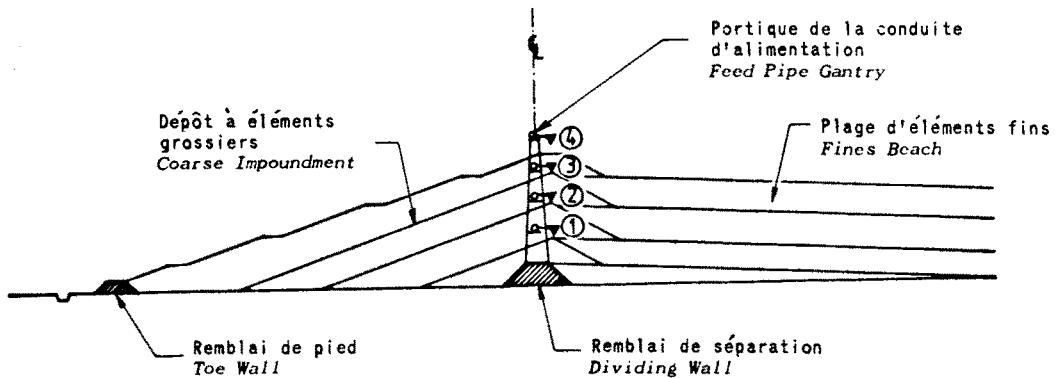


FIG. 4-5  
Cyclonage par la méthode centrale  
*Cycloning by centreline method*

cyclones and to allow their movement vertically upwards without burying them in the deposited material.

Fig. 4-5 illustrates this method.

#### 4.2.2.7 Central Cyclone Stations Methods

This technique involves the separation of the tailings slurry feed into coarse and fine fraction at a centralised cyclone station in the vicinity of the tailings dam, as opposed to the previous techniques which do the separation process on the tailings wall as it grows. The coarse material would then be placed hydraulically or mechanically.

#### 4.2.3 Spigot Discharge Wall Building Techniques

Spigots are multiple outlets along a delivery line and are used when it is both possible and desirable to cause a grading split between the coarse and fine fractions of the tailings product. Spigots break up the tailings discharge stream into smaller volumed streams, thus allowing a rapid drop in stream velocity. This velocity drop enables the coarser fractions to settle out swiftly. Particle sizes decrease with distance from the spigot, the finer fraction reaching the pond area. Sufficient spigots are opened at any one time to cater for the full delivery stream.

Compared with the cyclone techniques which permit an immediate, more efficient separation of the coarse fraction of the tailings, where justified from an operational viewpoint, the spigot method is used where its more economical, natural grading process is acceptable.

Le système de "spigots" de construction des massifs de stériles se limite principalement aux techniques amont de construction de barrages, bien que les techniques aval et de l'axe puissent être appliquées avec des résultats favorables. Après chaque cycle de mise en place, un nouveau massif de confinement doit être construit.

Ce massif sert de digue pour la mise en dépôt suivante et comporte une revanche suffisante pour contenir l'eau de la retenue.

La construction de massifs est un procédé mécanique ou manuel qui exige la mise de côté de certaines sections de lignes, tout en permettant à la mise en place continue de se poursuivre à d'autres sections. Pour la construction par moyens mécaniques de ces massifs, on utilise des "bulldozers", des chargeurs frontaux, des rétro-excavatrices et des chargeurs du type "scraper-loaders", mais aussi des pelles manuelles. En plus d'une revanche verticale, découlant de la construction même du massif, une plage formée par la technique des "spigots" développe sa propre revanche. Les fractions à gros éléments se déposent avec une pente plus raide que les fractions fines. La Fig. 4-6 illustre la méthode de mise en place par jets multiples "spigots".

Le volume d'emmagasinement ainsi créé peut aider concrètement à la gestion de la retenue en maintenant l'eau à bonne distance du bord du barrage de stériles.

Il est noté que si les barrages formés par jets multiples "spigots" requièrent des capitaux et coûts d'exploitation plus faibles que les barrages cyclonés, la séparation des éléments ne peut pas être aussi bien contrôlée.

Un litage horizontal est inévitable à un certain degré, ce qui réduit la perméabilité verticale tout en facilitant la percolation horizontale dans les stériles.

#### 4.2.3.1 Ligne principale d'apport laissée au niveau du terrain

Il est évidemment avantageux de laisser la principale ligne d'apport à sa position initiale au niveau du terrain. Ceci permet une inspection et un entretien faciles. Ce système est basé sur une possibilité d'extensions adaptées aux lignes ou embranchements de tuyaux et boyaux à jets multiples ("spigots").

##### a) Lignes à jets multiples (spigots) extensibles

À mesure que la hauteur du barrage augmente, les lignes "spigots" sont prolongées alors que la ligne principale est laissée en arrière. Ces lignes peuvent être prolongées facilement et leur diamètre est plus petit que celui de la ligne principale (voir Fig. 4-7). Cependant, en particulier lorsque ces lignes de tuyaux à "spigots" doivent suivre le profil du barrage comme indiqué dans la Fig. 4-8, de fortes pertes de charge peuvent se produire et causer des problèmes de pompage ou l'éclatement des tuyaux.



The spigot system of impoundment wall building is limited in the main to upstream methods of dam construction, although centre line and downstream construction methods can be used with favourable products. After each spigot cycle a new containment wall has to be built. This wall provides both the dam to impound the next spigot deposition and provide vertical freeboard to contain the pond water.

Wall building is a mechanical or manual process requiring that sections of the spigot lines be moved out of the way, while allowing uninterrupted deposition to continue on other sections. Bulldozers, front-end loaders, backactors and scraper-loaders are used to build these walls mechanically, while shovels wielded by manual labour are also used.

In addition to the vertical freeboard provided by the wall construction, the spigotted beach develops beach freeboard. The coarser fractions deposit at a steeper slope than the finer fractions. Figure 4-6 illustrates the general spigot discharge deposition method.

The storage volume thus created can materially assist pond management by keeping the water well away from the edge of the tailings dam.

It should be noted that while spigotted dams often involve lower capital and operational costs than cycloned dams, the particle separation achieved is not nearly as controllable. A degree of horizontal layering is inevitable and this reduces vertical permeability and encourages horizontal seepage flow in the tailings.

#### 4.2.3.1 Main Delivery Line Left on the Ground Level

It is obviously an advantage if the main delivery line can be left in its original position at ground level. Maintenance and inspections are then easily carried out. This system relies on extensions to the spigot outlet pipes or branch lines.

##### a) Extendable Spigot Lines

As the dam grows in height, the spigot lines are extended while the main line is left behind. These spigot lines, of smaller diameter than the main delivery line, are easy to extend (see Fig.4-7). However and particularly if these spigot pipes have to follow the dam profile as shown in Fig. 4-8, high friction heads can be developed leading to pumping problems or burst pipes.

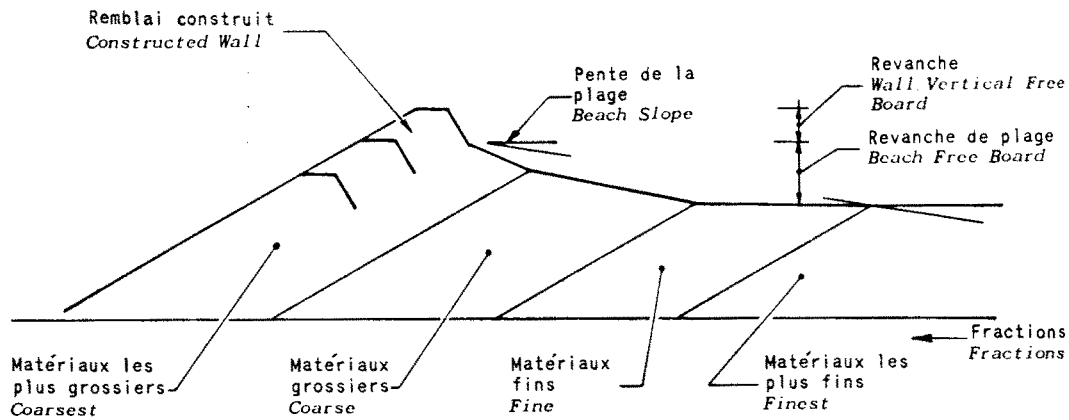


FIG. 4-6  
Méthode de construction à lances  
Spigot method of construction

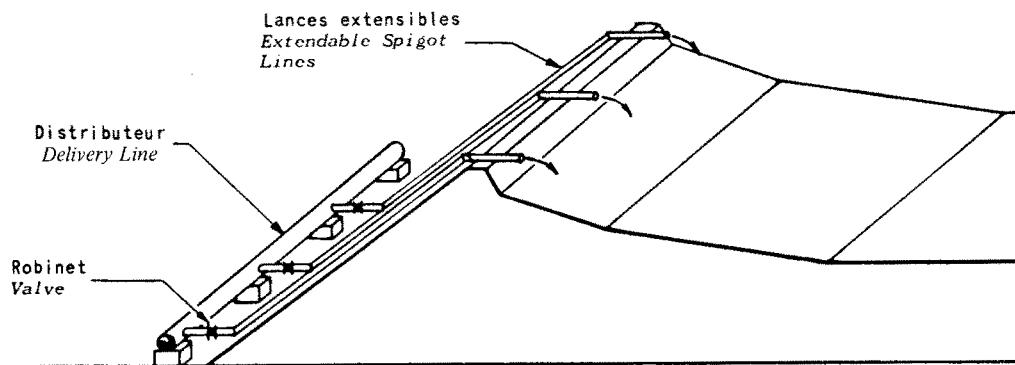


FIG. 4-7  
Système de lances extensibles  
Spigot system with extendable spigot lines

#### b) Embranchements extensibles

La ligne d'apport principale comprend des embranchements allant jusqu'au dessus du barrage. Dans ce cas, la ligne est dérivée vers une ligne secondaire du côté intérieur et parallèle à la crête du barrage. Cette ligne secondaire a des ouvertures "spigots" à intervalles réguliers. Bien qu'exigeant deux ensembles de tuyaux, le système secondaire est souvent calibré pour une faible pression avec un plus petit diamètre. (Fig. 4-9).

#### 4.2.3.2 Ligne principale levée périodiquement

Lorsque les lignes à "spigots" montrées dans les figures 4-7 et 4-8 deviennent trop longues, la ligne principale doit être levée à une nouvelle "cote de base" appropriée. Pour bien réaliser cette levée, des bermes convenables sont requises, tel que montré dans la Fig. 4-10.

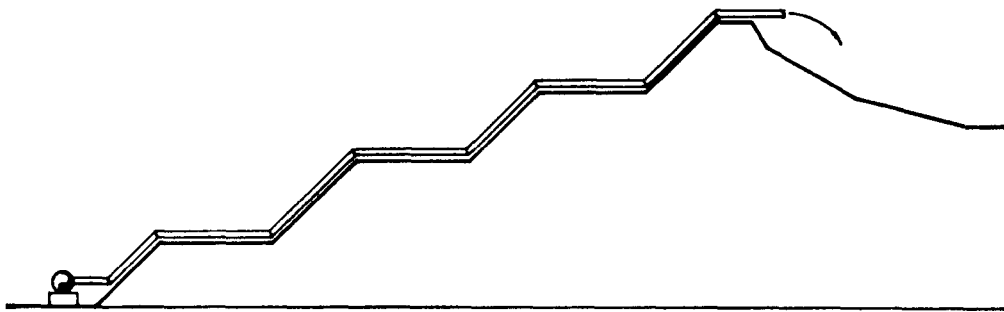


FIG. 4-8

Système de lances prolongées suivant le profil d'un barrage  
*Spigot system with extended spigot lines following dam profiles*

#### b) Extendable Branch Lines

Branch lines are led from the main delivery line to the top of the dam. Here the line is led into a secondary line inside and parallel to the crest of the dam, which has controllable spigot holes in it at suitable intervals. While requiring two sets of pipes, the second set is often of a lower pressure rating and smaller diameter (see Fig. 4-9).

#### 4.2.3.2 Main Delivery Line Periodically Lifted

When the spigot lines shown in Fig. 4-7 and 4-8 become too long, the main delivery line should be lifted to a suitable new base elevation. To accomplish this lift, suitable stepbacks are required in the dam profile, as shown in Fig. 4-10.

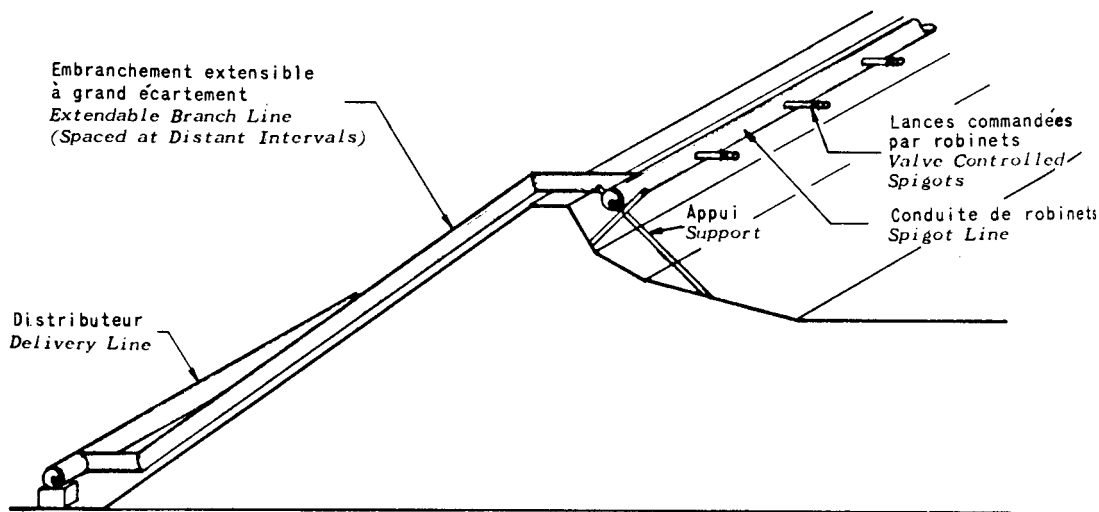


FIG. 4-9  
Système de lances avec embranchement extensible  
*Spigot system with extendable branch line*

Il existe encore une autre technique de "spigotage" pour les cas où les bermes de la pente amont (ou digues secondaires) sont espacées de 2 à 3 m et que le distributeur principal de chaque digue secondaire est déplacé auquel cas les déviations des conduites de lances courtes pointent vers le bas seulement. L'avantage de cette solution est que la pulpe ne se déverse sur la pente amont ni quand on nettoie les déviations des conduites de lances ni en cas de bris du distributeur principal, des déviations ou des robinets. Cette technique convient pour les grands chantiers ou dans les dernières phases des travaux, quand le niveau d'eau monte de 1 à 3 m.

#### 4.2.3.3 Directives pour l'exploitation

Le système "spigots" de mise en dépôt des stériles peut présenter plusieurs lacunes, particulièrement en ce qui concerne la construction du massif de retenue. On doit veiller à ce que ce massif ne soit pas construit trop haut sans tenir compte des exigences normales de conception telles que la compaction, l'angle de la pente extérieure, etc. Les cas de forte érosion (renards) se produisant à travers des barrages mal construits sont légion. Il faut veiller de plus à ce que les boues (slimes) placées dans de tels barrages soient suffisamment imperméables. Toute agrégation ou motte de stériles doit être détruite et compactée. Il peut s'avérer nécessaire de prendre continuellement des mesures d'entretien à mesure que se poursuit la mise en dépôt, comme par exemple l'humidification du massif pour colmater les fissures de retrait et le remplissage des sillons produits par l'érosion. Le "spigotage" bien réalisé implique une manoeuvre des robinets telle que le courant de la pulpe est toujours normal au front de spigotage. Ce n'est que de cette manière que le fractionnement peut avoir lieu uniformément et graduellement, sans discontinuités qui favoriseraient la percolation et affecteraient la stabilité.

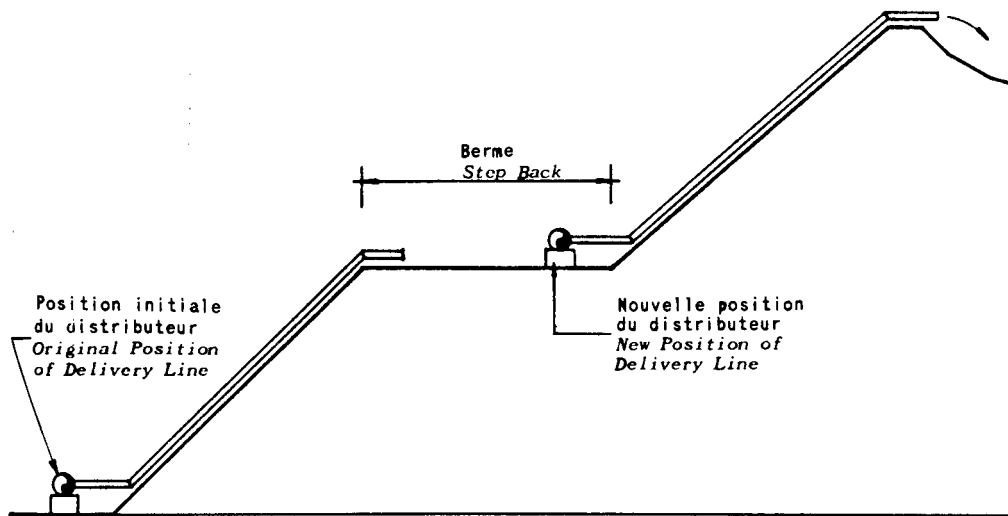


FIG. 4-10

Système de lances : Levage du distributeur principal  
 Spigot system : Lifting of main delivery line

There is still another technology of spigotting, when berms on the downstream slope (or secondary dikes) are constructed at intervals of 2 to 3 m. and the main delivery line of each secondary dike is shifted. In that case, the short spigot pipe deviations point downwards only. The advantages of this type consist in not letting off pulp on the downstream slope when spigot pipe deviations are cleaned and in cases of failures with the delivery line, the deviations and the taps. This technology is suitable for large sites, or during their later stages when the annual rise in height is 1 to 3 m.

#### 4.2.3.3 Guidelines for Operation

Many pitfalls may exist in the spigot system of tailings disposal, particularly in the construction of the impoundment wall. Care should be taken not to build this tailings wall too high without adequate regard to standard dam wall requirements such as compaction and angle of outer face. Cases of severe piping erosion through inadequately constructed walls are legend. In addition care should be taken that the slimes placed in such walls is sufficiently impervious. Clods and lumps of tailings should be broken down and compacted. It may be necessary to carry out continuous maintenance of such walls as deposition proceeds, such as wetting the wall to close shrinkage cracks, and filling erosion gulleys.

Correct spigotting is achieved by manoeuvring the valves of the spigotting outlets so that the pulp stream is always normal to the spigotting front. Only thus can the separation of the fractions take place uniformly and gradually, without discontinuities which would cause increasing seepage and endanger the stability.

#### 4.2.4 Système à enclos multiples (paddock)

Dans le cas d'un système à enclos, les stériles sont déposés dans un enclos construit à l'aide de diguettes et formant une aire fermée ou une cuvette. On y dépose de 100 à 150 mm d'épaisseur de stériles et après leur précipitation, l'eau de décantation est écoulee vers la retenue. Après une période d'assèchement, les diguettes sont rehaussées de nouveau à la main ou à l'aide de moyens mécaniques. La technique est basée sur l'assèchement par évaporation et ne convient qu'en des conditions climatiques arides et semi-arides.

Un réseau de cuvettes (paddocks) est construit le long du périmètre du barrage ou le long du bord d'une retenue; chaque cuvette est utilisée successivement pour la mise en dépôt, le reste du matériau étant déposé dans la retenue. Le cycle de mise en dépôt dépend de la vitesse de montée du barrage; il est maintenu aussi long que possible pour permettre à la couche de dépôt précédente de s'assécher par drainage et par évaporation avant la mise en place de la couche suivante.

La technique de construction par cuvettes (paddock) peut être utilisée avec les techniques de construction aval, amont ou axe central, tel qu'indiqué dans les Fig. 4-11, 4-12 et 4-13. Elle convient particulièrement aux matériaux de grosseur uniforme. Lorsque utilisée avec des matériaux de grosseur variable, une ségrégation par gravité des différentes grosseurs donne lieu à la formation d'une série de couches horizontales d'éléments fins, ayant pour effet l'augmentation du rapport de la perméabilité horizontale à la perméabilité verticale. Le résultat peut être un dépôt possédant de hautes propriétés anisotropiques, une grande surface de percolation et les problèmes qui s'ensuivent relatifs à la stabilité des pentes.

Bien que le système "paddock" tel que décrit soit très commun pour les stériles (ou boues) de mines d'or, il a été adapté à d'autres stériles à une échelle beaucoup plus grande. Des massifs de confinement ayant jusqu'à 2 m sont construits autour d'un étang à l'aide de moyens mécaniques. La cuvette est ensuite remplie à plein jet. On y dépose jusqu'à 1 m de stériles à la fois. La construction du barrage proprement dit progresse ainsi en poussant les matériaux depuis l'aire de mise en dépôt vers la face extérieure au moyen de bulldozers ou scrapers, de manière à former le massif de retenue à partir des dépôts futurs. Cette opération est par conséquent exécutée depuis l'intérieur du barrage et peut produire un barrage insuffisamment compacté. En général, il n'est pas nécessaire d'apporter un équipement de compaction spécialisé sur un barrage puisque le trafic de construction produit un compactage adéquat. A cette fin, le massif extérieur doit être assez large pour porter le matériel de construction en toute sécurité, c'est-à-dire que la largeur de la crête doit avoir au moins 1,5 fois la largeur roue à roue du matériel utilisé. Un nombre de passes suffisant doit être effectué pour assurer la pulvérisation du matériau et son compactage, tel que montré sur les figures 4-14 et 4-15. Quelques stériles contiennent des agents liants lesquels transforment les stériles déposés en une masse compacte qui doit être brisée pour la mise en place du barrage. Si les grands mor-

#### 4.2.4 Paddock System

In the paddock system tailings are deposited in a paddock constructed by forming a walled enclosed area or pond. 100 mm to 150 mm depth of tailings is deposited in the paddock and, after settling, the supernatant water is led off to the pool. After a period of drying the surrounding walls are raised again by hand or by using mechanical aids. The method relies heavily on evaporative drying and is only suitable for arid and semi-arid climatic conditions.

A grid of paddocks is constructed around the dam perimeter or along the line of an impoundment. Each paddock is used in turn for deposition, the balance of the material being deposited in the body of the impoundment. The deposition cycle depends on the rate of rise of the dam and is kept as long as possible to allow the previous layer of deposition to dry out by draining and by evaporation before the next layer is deposited.

The paddock system of construction can be used with either downstream, upstream or centre-line construction methods as indicated in Fig. 4-11, 4-12 and 4-13. It is particularly suitable for single sized products. When used with graded products, gravitational sorting of the particle sizes results in the formation of a series of fine horizontal impervious layers which have the effect of increasing the ratio of horizontal permeability to vertical permeability. The result may be a deposit with highly anisotropic properties, a high seepage surface and consequent problems with slope stability.

Although the paddock system as described is very commonly used for gold mining tailings or slimes, it has been adapted to other tailings on a much larger scale. Containment walls of up to 2 m depth are built round the paddock by mechanical means. The paddock is then filled by open-ending into it. Up to one metre of tailings is deposited at a time. Wall building proceeds by scraping material up from the deposition area and placing it on the outer face of the dam by means of front-end loaders, bulldozers or scrapers, to form the containment wall for future depositions. This operation is therefore carried out from inside the dam and can result in a loose uncompacted wall. It is generally not necessary to introduce specialized compaction equipment on tailings dams as construction traffic produces adequate compaction. To achieve this the outer wall must be wide enough to safely carry the construction plant, i.e. the width of the top of the wall should be at least 1.5 times the width of track of the plant being used. Sufficient passes should be made to ensure that the material is broken up and compacted, as shown in Fig. 4-14 and 4-15. Some tailings contain cementing agents which set the deposited tailings into a compact mass which has to be broken up for placement on the wall. If the larger fragments are not broken up during the scraping, placement and compaction process, the voids between them form passages leading to piping flows through the wall.

Enclos typiques  
Typical Paddock Walls

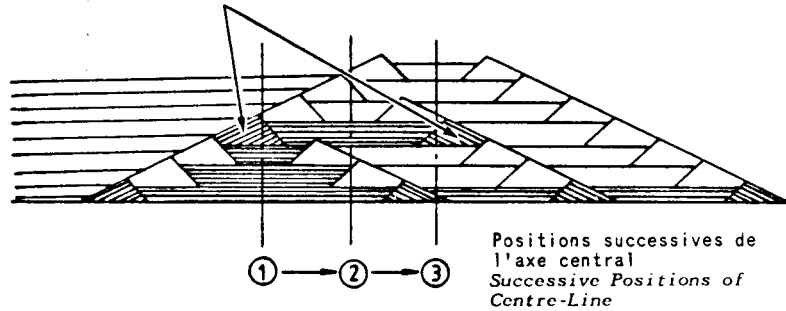


FIG. 4-11

Système d'enclos : Construction aval  
Paddock system : Downstream construction

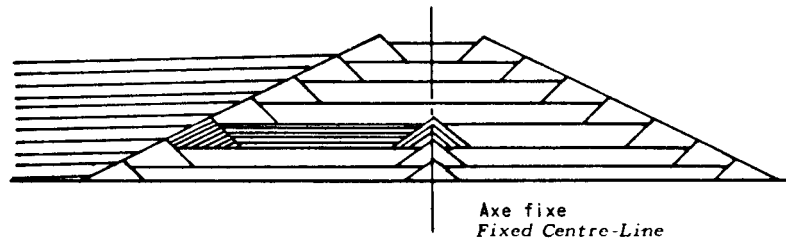


FIG. 4-12

Système d'enclos : Construction centrale  
Paddock system : Centreline construction

ceaux ne se défont pas durant le raclage, la mise en place et le compactage, les vides qui restent entre eux forment des voies préférentielles pouvant conserver l'érosion interne (renards) du barrage.

#### 4.2.5 Mise en place des stériles par moyens mécaniques

Bien que le transport et la mise en place des stériles par moyens hydrauliques soit considéré habituellement comme l'un des systèmes le plus efficaces, il est des occasions où il est avantageux d'utiliser un système mécanique de transport et mise en place ou une combinaison des deux systèmes. Cette section ne traite pas de l'usage d'équipement mécanique sur des barrages construits avec le système à ligne-robinet (spigot) ou à enclos (paddock), lesquels ont déjà été discutés dans les sections 4.2.3 et 4.2.4.

L'usage le plus important de la méthode mécanique répond à la nécessité d'obtenir un barrage "sec", c'est-à-dire un barrage où il n'y aura pas de grandes quantités de liquides exigeant des systèmes de déversement.



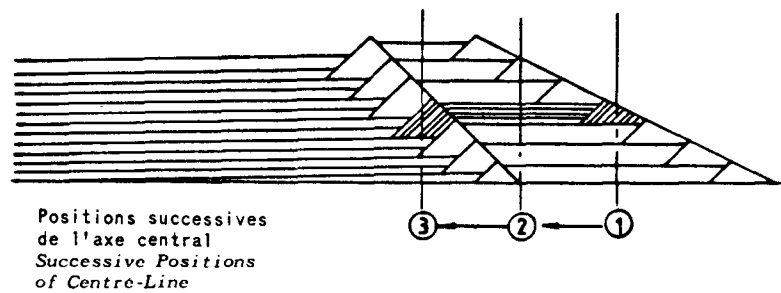


FIG. 4-13  
Système d'enclos : Construction amont  
*Paddock system : Upstream construction*

#### 4.2.5 Mechanized Placing of Tailings

Although hydraulic transport and placement of tailings is usually the most efficient system for tailings disposal, there are occasions when it is advantageous to use mechanical transport and placement or a combination of hydraulic transport and mechanical placement. This section excludes the use of mechanical plant for wall building on spigotted and paddocked dams which have already been discussed under sections 4.2.3 and 4.2.4.

The major use of mechanized placement is where a dry dam is wanted, i.e. where there will not be large quantities of tailings effluent requiring decant systems.

De tels barrage où dépôts peuvent être mis en place à l'intérieur d'une zone de retenue, laquelle permettra de contrôler le ruissellement de surface du dépôt et la faible quantité de débit de percolation pouvant se produire. De cette façon un dépôt relativement important peut être formé à l'intérieur d'un système de digues de faible hauteur (cf figure 4-16).

De plus, un dépôt conique donne un rapport très favorable entre la surface d'entrepôt et le volume emmagasiné. Les barrages secs peuvent devenir nécessaires lorsque la partie liquide des stériles est particulièrement délétère ou nocive et qu'il est à recommander de l'enlever avant le dépôt des stériles, ou dans un cas où les caractéristiques de dépôt et de consolidation laissent à désirer et représentent un grand volume de matériau particulièrement sensible, si une méthode normale de mise en dépôt est adoptée. Une autre raison pour l'emploi d'équipement mécanique, le climat, pourrait rendre dangereuse ou peu pratique la méthode hydraulique de mise en dépôt.

La mise en place mécanique des stériles est employée souvent dans des usines où la production ne justifie pas un grand barrage pouvant être construit hydrauliquement, ou dans le cas où la mise en

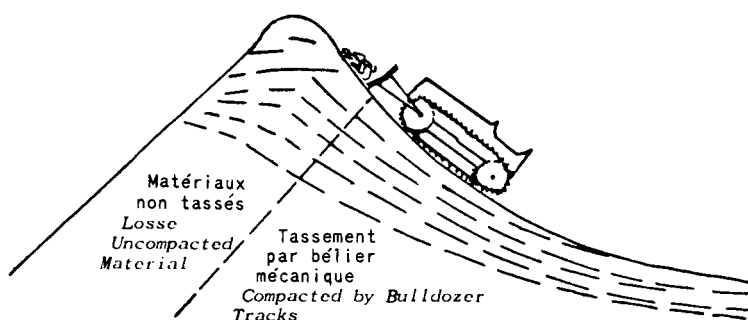


FIG. 4-14

Système d'enclos : Tassement insuffisant du remblai extérieur  
*Paddock system : Outer wall inadequately compacted*

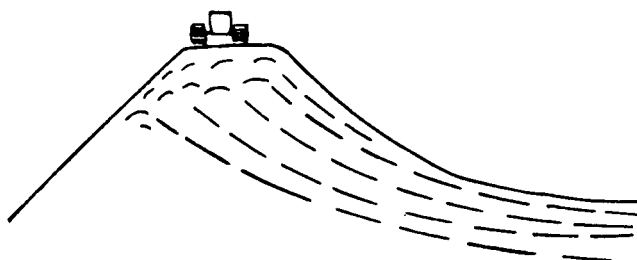


FIG. 4-15

Système d'enclos : Tassement total du remblai extérieur par engins mécaniques  
*Paddock system : Full compaction of outer wall by machines.*

Such dams or dumps can be placed within an impoundment, which will control the surface run-off from the dump and the small amount of seepage which may occur. In this way a relatively high dump can be formed within low impoundment walls, as shown in Figure 4-16.

Furthermore a conical dump gives a very good relationship between surface area and volume of material stored. Dry dams may be required where the tailings liquor is particularly noxious and it is advisable to remove it before the tailings are deposited or where the settling and consolidation characteristics of the tailings are poor, leading to a large volume of very sensitive material if normal hydraulic deposition is used. A further consideration which would necessitate mechanical placement is climatic conditions which make hydraulic deposition hazardous or impracticable.

Mechanized placing of tailings is often used for smaller plants where the output does not warrant a large dam suitable for hydraulic deposition, or where hydraulic deposition would not produce

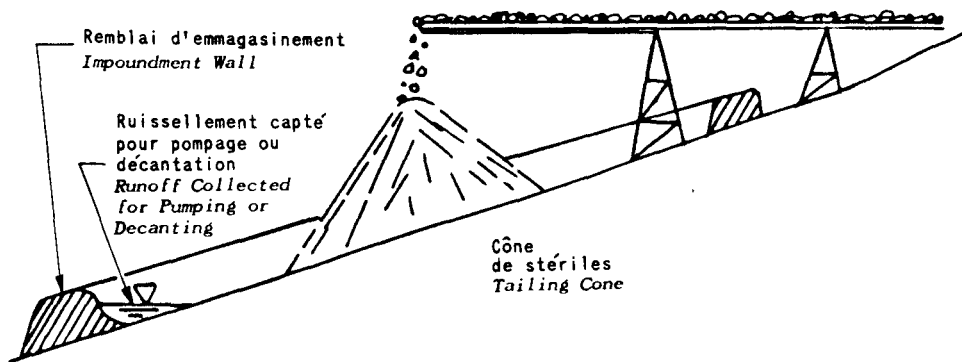


FIG. 4-16

Mise en place mécanique : Cône de stériles entouré  
*Mechanical placing : Contained cone of tailings*

dépôt hydraulique ne produirait pas assez de matériau de la qualité requise pour la construction. Cette méthode présente en outre des avantages lorsque l'usine produit des stériles variés qui doivent être déposés sur des zones séparées, car le déversement mécanique permet un bon contrôle de la surface exacte où l'on doit déposer un certain type de stériles. La mise en place mécanique peut aussi être utilisée comme complément d'un système hydraulique, particulièrement au cours des phases initiales de construction avant que le système hydraulique n'entre en pleine exploitation, et en satisfaisant aux conditions topographiques pouvant présenter des difficultés dans l'exécution du programme directeur de la construction.

#### 4.2.5.1 Teneur en eau

La manutention et la mise en place mécaniques exigent que le matériau soit au moins dans un état plastique ou semi-solide. Si les stériles sont dans cet état lorsqu'ils sont déchargés à partir d'un procédé d'extraction, par exemple une croûte filtrante (filter cake), ces stériles peuvent être transportés mécaniquement par camion ou par convoyeur jusqu'à l'endroit de dépôt. Lorsque le produit possède une teneur en eau élevée ou lorsqu'il a été transporté hydrauliquement jusqu'au dépôt, la teneur en eau sera trop élevée pour une manutention mécanique directe. Un traitement approprié sera alors nécessaire afin de réduire cette teneur en eau. Ceci pourra se faire à l'aide de filtres, séchoirs mécaniques ou hydrocyclones. Lorsque le matériau doit porter le poids de camions ou autre matériel mécanique utilisé pour sa mise en place et son épandage, la teneur en eau du matériau déposé doit être assez basse pour permettre au trafic de construction de passer dessus sans s'y enliser. Lorsque les conditions climatiques sont favorables, un procédé à deux phases peut être utilisé permettant l'assèchement par drainage naturel et évaporation du matériau déposé avant d'être déplacé et redéposé à son emplacement final.

Il est à noter que dans un dépôt constitué mécaniquement, le matériau est déversé à la teneur en eau avec laquelle il est livré aux organes de déversement et le tas s'élève de façon continue sans périodes spécifiques d'assèchement comme dans le cas de matériau déposé hydrauliquement. L'assèchement qui se produit dans le matériau déversé est par conséquent dû aux conditions climatiques et au rythme de déversement. Ce dernier est normalement assez rapide pour permettre d'obtenir un rendement maximum et il n'est pas rare de constater que le tas est pratiquement saturé avec une nappe phréatique élevée. Ceci est à retenir lorsque l'on étudie le drainage et la stabilité d'un dépôt et ses environs.

Le niveau phréatique dans le barrage peut être obtenu par un piézomètre et doit être surveillé de façon permanente.

#### 4.2.5.2 Systèmes mécaniques de déversement

Le déversement mécanique s'applique à la mise en place de stériles en grandes quantités dans les cas où il n'y a pas d'exigences spécifiques de compaction ou résistance, à l'exception de celles qui

enough material of the quality required for wall building. It also has advantages where the plant produces different tailings products which need to be deposited in separate areas, as mechanical dumping gives a great measure of control as to the exact area where a certain tailings product is to be placed. Mechanical placing can also be used as an adjunct to a hydraulic disposal system, particularly in the early stages of construction before the hydraulic system can come into full operation and in dealing with the topographic features which present difficulties to the main construction program.

#### 4.2.5.1 Moisture Content

Mechanized handling and placement requires that the material shall at least be in a plastic or semi-solid state. If the tailings product is in this state when discharged from the extraction process, e.g. filter cake, it can be transported mechanically by truck or conveyor system to the disposal site. Where the processed product has a high moisture content or has been transported hydraulically to the deposition site, the moisture content will be too high for direct mechanical handling and some treatment will be required to reduce the moisture content. This may be done by means of filters, mechanical driers or hydrocyclones. Where the placed material has to carry the weight of trucks or mechanical equipment used to place and spread it, the moisture content of the placed material must be low enough to allow the construction traffic to pass over it without becoming bogged down. Where climatic conditions are suitable, a two stage process can be used where the dumped material is allowed to dry out by natural drainage and evaporation before being moved and placed at its final location.

It should be noted that in a mechanically deposited dump, the material is dumped at the moisture content at which it is delivered to the dumping apparatus and the mound builds up continuously without specific drying periods as in the case of hydraulically deposited material. The drying which occurs in the dumped material is therefore due to the prevailing climatic conditions and the rate of dumping. The rate of dumping is normally relatively fast to obtain maximum efficiency from the apparatus and it is not uncommon to find that the mound is virtually saturated, resulting in a high water table within it. This should be borne in mind when considering drainage and the stability of the mound and its environs.

The position of the phreatic line in the dams can be obtained from piezometer readings and should be monitored at all times.

#### 4.2.5.2 Mechanical Dumping Systems

Mechanical dumping applies to the mass placement of tailings where there are often no specific requirements for compaction or strength, except those which are inherent to the system that is

sont inhérentes au système utilisé. On dispose actuellement de nombreux systèmes mécaniques: le système ou la combinaison de systèmes les plus appropriés doivent être choisis de façon à satisfaire aux besoins spécifiques de chaque exploitation.

On peut utiliser des camions routiers ou non-routiers à partir de l'usine ou d'un poste d'assèchement à l'endroit du dépôt. Le plus grand mérite de ce système réside dans sa souplesse, en déposant chaque chargement de stériles à l'endroit exact où il est requis. Le tas peut être construit par déversement en bout de course (end-tipping), mais cette méthode n'est pas recommandée puisqu'elle produit une surface extérieure non consolidée et une surface de crête trop faible pour porter le trafic de construction pour la levée suivante.

Un dépôt beaucoup plus stable pourra être constitué si les stériles sont placés par couches compactées par le trafic de construction. Des niveleuses ou des bulldozers peuvent aider à l'épandage des couches. Le système mécanique le moins souple est le convoyeur fixe à courroie qui dépose le matériau en un point pour former un cône. Une plus grande souplesse peut être conférée à un convoyeur à courroie en l'équipant d'une ou plusieurs rallonges de telle manière que des cônes puissent être formés en plusieurs points. Un tel système doit tenir compte de l'effort nécessaire pour déplacer la rallonge et de la fréquence à laquelle il faut la déplacer.

On veillera à localiser les divers cônes de telle manière qu'ils n'empêcheront pas le drainage du ruissellement de surface en créant des bassins à l'intérieur de la zone de dépôt. Du matériel d'épandage et de dépôt par jet ou entassement (flinger or stacker) peut être utilisé conjointement avec la décharge du convoyeur à courroie pour distribuer les stériles sur une grande surface. Ceci produira un tas ayant des pentes latérales qui n'excéderont pas l'angle de repos naturel du matériau. Il est à noter que contrairement aux méthodes discutées précédemment, les entassements ne seront pas lités, mais plutôt parcellaires.

Le transport aérien permet de déposer le matériau à n'importe quel point de la trajectoire suivie; une série de cônes peut ainsi être déposée pour former une chaîne et si le système aérien de transport peut être déplacé latéralement, toute la surface de dépôt pourra être convertie. Ce système peut être utilisé avec grand succès lorsque les stériles peuvent être ségrégués en éléments distincts gros et fins: l'élément gros est déversé par transport aérien sur la périphérie pour former les limites du dépôt tandis que l'élément fin est déposé hydrauliquement dans la zone centrale.

Dans le procédé à deux étapes, le matériau déversé peut être épandu par bulldozer, scraper, niveleuse ou chargeur frontal; il peut même être redistribué à l'intérieur de la zone de dépôt par camion. Non seulement ces opérations rendent plus facile le contrôle de la forme du dépôt, mais le trafic de construction compacte les stériles. Lorsque les stériles déposés sont secs et en mottes, il faudra s'assurer qu'ils seront écrasés et bien compactés; sinon l'eau de ruissellement s'écoulera par les vides

used. Various mechanical systems are available and the most appropriate system or combinations of systems will have to be selected to meet the specific needs of each tailings operation.

On-road or off-road trucks can be used directly from the plant or from a drying station at the disposal site. The greatest merit of this system is the flexibility it gives in placing each load of tailings in the exact place where it is required. The dump may be built up by end-tipping, but this is not recommended as it leads to a loose unconsolidated outer surface and a weak top surface which has to carry construction traffic for the next placement. A much more stable dump will be formed if the tailings are placed in layers and compacted by the construction traffic. Graders or bulldozers may be used to assist in spreading the layers. The least flexible mechanical system is the fixed conveyor belt which deposits the material at one point to form a cone. Greater flexibility can be given to a conveyor belt by providing one or more movable extensions so that cones can be formed at several places. Such a system must take into account the effort required to move the extension and the frequency with which it will have to be moved.

Care must be exercised in locating the different cones to ensure that they do not impede the drainage of the surface runoff and form catchment basins within the dump. Spreader, flinger or stacker equipment can be used in conjunction with the conveyor belt discharge to distribute the tailings over a larger area. This will result in the formation of a mound with side slopes which will not exceed the natural angle of repose of the material. It should be noted that in contrast to the methods previously discussed, deposition mounds will not be layered but may be patchy.

Overhead tramming allows material to be deposited at any point along its traverse, thus a series of cones may be deposited to form a ridge and if the overhead system can be shifted laterally, the whole deposition area can be covered. This system can be used very successfully where the tailings can be separated into distinct coarse and fine products: the coarse product is dumped by overhead tramming round the periphery to form the impoundment walls while the fines are deposited hydraulically in the central area.

In the two stage process the dumped material may be spread by bulldozer, scraper, grader or front-end loader and may even be re-distributed within the deposition area by truck. Not only do these operations make it easier to control the shape of the dump but the construction traffic compacts the tailings.

Where dry lumpy material is placed, care must be taken to ensure that it is broken up and well compacted otherwise surface water

causant ainsi de l'érosion qui produira des renards et des affaissements locaux.

#### 4.2.5.3 Construction de remblais par moyens mécaniques

Les exigences pour la mise en place de remblais sur des barrages construits par des méthodes mécaniques sont les mêmes que pour des barrages construits par les méthodes ligne-robinet (spigot) et "à enclos", tel que décrit dans les sections 4.2.3 et 4.2.4.

#### 4.2.6 Remblais de stériles construits avec de la terre ou des enrochements

Lorsque les propriétés des stériles ne conviennent pas à la construction de remblais, ou que la nature du terrain ou le climat excluent l'utilisation des stériles pour la construction de ces remblais, on utilise de la terre ou des enrochements pour la construction de barrages de retenue. Les facteurs économiques jouent également un rôle et dans quelques cas on retire un avantage d'ensemble de la mise en dépôt de tout rebut de rocher ou mort-terrain dans la forme d'un barrage de retenue. Les retenues de vallée conviennent particulièrement à ce type de construction surtout lors des étapes initiales de la mise en dépôt quand une montée rapide du remblai est requise pour augmenter le volume de dépôt assez vite pour contenir le volume de stériles en cours de production. Ces ouvrages peuvent être subdivisés d'une part en remblais imperméables et perméables et, d'autre part, en ceux qui sont construits à leur hauteur et forme définitive en une seule opération relativement rapide, pratiquement avant le début de l'emmagasinement et ceux construits de façon continue ou par étapes tout en maintenant la revanche nécessaire au dessus des stériles et de l'eau dans la retenue.

##### 4.2.6.1 Remblais imperméables

Lorsque les stériles contiennent des composantes produisant des effluents nocifs, les règlements locaux contre la pollution peuvent exiger que les retenues soient imperméables pour empêcher toute percolation d'effluents à travers les remblais proprement dits ou vers la nappe souterraine. Les remblais de retenue doivent alors être imperméables. En de tels cas, les remblais sont construits en utilisant les procédés normaux de construction de barrages hydrauliques conventionnels en terre ou enrochements munis d'un revêtement imperméable d'argile ou d'un matériau synthétique sur la face amont ou en noyau, liés à un mur d'étanchéité ou à un revêtement de pied (Fig. 4-17).

##### 4.2.6.2 Remblais perméables

Lorsque de la terre ou plus particulièrement des enrochements sont utilisés pour simplement fournir la stabilité du remblai extérieur, la percolation à travers le remblai est permise. Dans ce cas également, les remblais sont construits en utilisant les techniques de construction acceptées pour les barrages conventionnels, mais au lieu d'un revêtement imperméable, la face amont requiert une couche filtrante convenable pour empêcher la migration des stériles par érosion vers et à travers le remblai de terre ou



will flow down through the voids causing internal erosion which can lead to piping flows and the formation of local depressions.

#### 4.2.5.3 Mechanical Wall Building

The placing requirements on mechanically placed dams are the same as for spigotted and paddocked dams as described in sections 4.2.3 and 4.2.4.

#### 4.2.6 Tailings Dam Walls Built with Earthfill or Rockfill

Where the engineering properties of the tailings are unsuitable for wall building, and/or the nature of the terrain and/or the climate preclude the use of the tailings for wall building, imported earth or rockfill are used for constructing the impoundment walls. Economic factors also play a role and in some cases overall benefit is derived by the disposal of any waste rock or overburden in the form of the tailings dam wall. Valley impoundments are most suited for this type of construction particularly in the early stages of deposition where rapid rise of the wall is required to increase the deposition volume fast enough to contain the volume of tailings that is being produced. These structures may be subdivided into impervious and pervious walls and into those which are constructed to final height and shape in one relatively fast operation virtually before impoundment starts and those which are raised continuously or in stage construction, keeping the necessary freeboard above the tailings and water in the impoundment area.

##### 4.2.6.1 Impervious Walls

Where the tailings contain materials which can give rise to noxious effluents, local pollution regulations may require that such containment areas shall be waterproof to prevent any seepage of the effluent through the walls or into the groundwater. The containment walls must therefore be impervious. In such cases the walls are constructed using the normal procedures for the construction of water retaining dams of earth or rockfill construction with an impervious lining of clay or synthetic material on the upstream or inside face, which is connected to an impervious cut-off or floor lining. This is shown in Fig. 4-17

##### 4.2.6.2 Pervious Walls

Where earthfill and more particularly rockfill is used simply to provide stability to the outer wall, seepage through the wall is permitted. Again the walls are constructed using accepted dam-building techniques but instead of an impervious liner, the upstream face must be covered by a suitable filter blanket to prevent tailings being eroded into and through the earth or rockfill wall. Provision must then be made for collecting the seepage water and controlling its discharge. Particular care is required

enrochements. Il faut alors veiller à la collecte des eaux de percolation et à contrôler leur décharge. Un soin particulier est nécessaire dans la mise en place des stériles sur la face amont afin de prévenir tout dommage aux couches filtrantes. Il est à recommander de déposer une couche protectrice de terre ou enrochement sur les filtres les protégeant ainsi contre l'effet érosif des stériles lors de leur mise en dépôt ou contre l'action des vagues. (Fig. 4-18)

#### 4.2.6.3 Construction à la hauteur finale

Les barrages de terre et enrochements ont normalement une coupe trapézoïdale dont la base est égale à environ six fois la hauteur du remblai. Ainsi, sur terrain plat, il faudra approximativement six fois plus de matériaux pour construire un mètre de hauteur à la base que pour l'élever d'un mètre au voisinage de la crête. Dans un site de vallée, la longueur initiale d'un remblai sera courte, mais à mesure que sa hauteur augmente vers les plus grandes largeurs de la vallée, la longueur du remblai augmente. La topographie du site détermine par conséquent le volume de matériaux requis pour chaque étape. Si l'on dispose d'assez de matériaux pour la construction du remblai jusqu'à sa hauteur finale, sa construction pourra être entreprise en une seule opération. La surface des fondations doit être nettoyée et le remblai doit être construit en étendant des couches horizontales de sol ou de roc et en les compactant. Lorsque les caractéristiques du roc déversé sont suffisantes pour constituer un remblai effectif, la méthode de déversement "à bout de course" (end tipping) peut être appliquée pourvu que les pentes soient ajustées aux valeurs correctes de conception.

#### 4.2.6.4 Construction de remblais par étapes

Dans plusieurs mines, la production de rebuts de rocher augmente à mesure que la mine prend de l'ampleur et non seulement il y a insuffisance d'enrochements disponibles initialement pour construire l'ensemble du remblai, mais souvent aussi insuffisance de matériaux pour construire la pleine largeur de la base du remblai. Par conséquent, la première étape du remblai doit être construite en utilisant les rebuts de roc produits durant cette étape afin de contenir les stériles produits durant la même période. Si l'on ne peut construire selon une coupe adéquate avec les matériaux disponibles, des matériaux d'apport seront requis. Chaque étape subséquente est construite en utilisant les matériaux disponibles de façon à obtenir une coupe permettant de contenir les stériles en prolongeant le remblai par la méthode de construction "aval" jusqu'à ce que la hauteur finale soit atteinte. Dans ce cas également, la construction par couches compactées est préférée, bien que des déversements latéraux puissent être adoptés si la pente est ajustée à la valeur correcte de conception. (Fig. 4-19)

Si l'aire réservée aux stériles est la même que l'aire réservée aux rebuts de roc, et la production de ces rebuts est plus grande que requise pour la construction d'un remblai, les matériaux excédentaires peuvent être déposés du côté intérieur du remblai pourvu que la continuité de la membrane imperméable ou de la couche filtrante soit assurée sans dommages. Fig. 4-20

in placing tailings against the upstream face to prevent damage to the filter layers and it is advisable to place a protective layer of earth or rockfill over the filters to protect them against scour erosion by tailings deposition or wave action. Fig. 4-18 illustrates this.

#### 4.2.6.3 Construction to Final Height

Earth and rockfill dams will normally be trapezoidal in cross-section with a base width as much as six times the final height of the wall. Thus on a level site approximately six times as much material will be required to construct one metre height of wall at its base than will be required to raise it the same height near the crest. In a valley location the initial length of wall will be short but as the wall rises into the broader sections of the valley, the length of wall will increase. The topography of the site will therefore determine the amount of material that will be required to reach any stage of construction. If enough material is readily available to permit construction of the wall to final height, then construction of the whole wall can be undertaken in one operation. The foundation area should be cleared and the wall should be built by placing horizontal layers of soil or rock and compacting them. Where the engineering characteristics of dumped rock are sufficient to form an effective wall, end-tipping may be used provided that the slopes are trimmed to the correct design slope.

#### 4.2.6.4 Stage Construction of the Wall

At many mines the production of waste rock increases as the mine develops and not only is there insufficient rockfill available initially to build the whole wall but often there is insufficient material to build the full width of the base of the wall. Therefore, the first stage of the wall must be constructed to utilize the waste rock produced during that stage to contain the tailings produced during the same period. If an adequate cross section cannot be constructed with the available material, additional material will have to be imported. Each succeeding stage is constructed using the available material to provide a cross section to contain the tailings by extending the wall by the downstream construction method until the final cross section at final height is reached. Here again layered compacted construction is preferred but side-tipping may be used provided that the slope is trimmed to the correct design angle. This is shown in Fig. 4-19 . Construction by stages may be dictated by economics.

If the tailings area is also the waste rock disposal area and the production of waste rock is greater than required for wall building, the excess material may be placed on the inner side of the wall provided that the impervious membrane or filter layer is continuous and undamaged, as shown in Fig. 4-20.

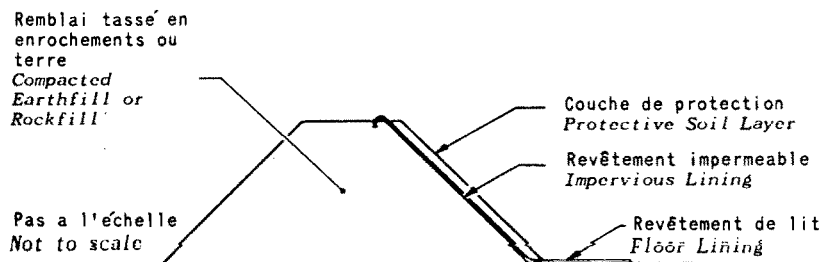


FIG. 4-17

Remblais de terre ou d'enrochement : Remblai imperméable  
 Earth and rockfill walls : Impervious wall

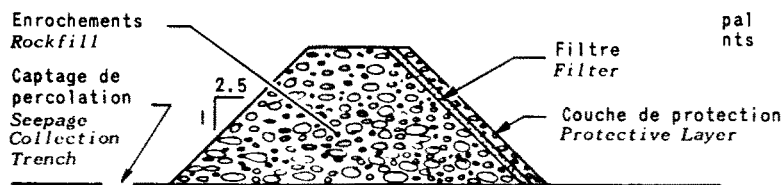


FIG. 4-18

Remblais de terre ou d'enrochement : Remblai perméable  
 Earth and rockfill walls : Pervious wall

#### 4.2.6.5 Mise en place de stériles en arrière de remblais de terre ou enrochements

Le remplissage d'un bassin de retenue en arrière d'un remblai de terre ou enrochements exige une exploitation et une gestion soignées. Si le remblai a été conçu pour résister aux poussées hydrostatiques, des contraintes élevées peuvent résulter lorsqu'une hauteur importante de boues de stériles non consolidées s'élève contre le remblai.

Il est par conséquent essentiel qu'une partie du premier remplissage soit placée contre le remblai. Ceci peut être réalisé par l'application soignée des méthodes ligne-robinet ou hydrocyclones ("spigotting" ou "cycloning") en veillant à ce qu'une couche de stériles grossiers puisse être placée au voisinage du remblai. La raison principale est de fournir une protection additionnelle aux couches filtrantes ou imperméables du remblai. Une autre raison veut que le dépôt de matériaux stables contre le remblai augmente son épaisseur effective tandis que le dépôt de stériles dans une profondeur d'eau élevée peut surcharger le remblai. Figure 4-21

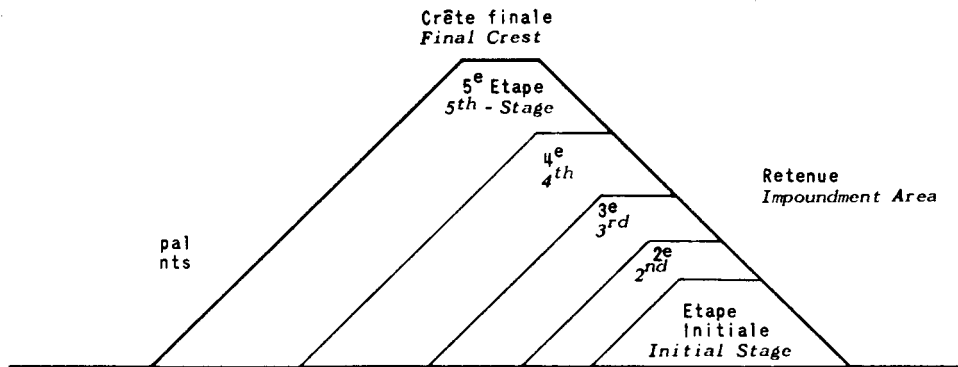


FIG. 4-19  
 Remblais de terre ou d'enrochement : Construction par étapes  
 Earth and rockfill walls : Stage construction of wall

#### 4.2.6.5 Placing of Tailings Behind Earth or Rockfill Walls

The filling of the basin behind an earth or rockfill wall requires careful operation and management. If the wall has been designed to resist the forces exerted on it by the excess water, serious overstressing can develop if a large depth of unconsolidated tailings slurry, with its higher density, builds up against the wall. It is therefore essential that some of the first filling should be placed on and against the wall. This may be done by careful spigotting or cycloning so that a layer of the coarser tailings can be built up next to the wall. The first reason is to provide additional protection for the filter or impervious layers in the wall and the second reason is that deposition of stable material against the wall increases its effective thickness whereas later deposition into a depth of water may lead to overstressing the wall. This is shown in Fig. 4-21.

The filter can quickly and efficiently be protected by woven or non-woven synthetic filter fabrics.

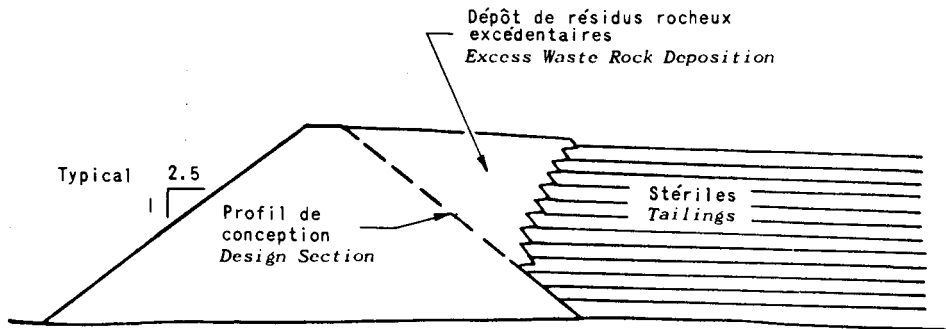


FIG. 4-20

Remblais de terre ou d'enrochement : Mise en place de résidus rocheux excédentaires  
*Earth and rock fill walls : Excess waste rock placement on wall*

#### 4.2.6.6 Contreforts ou appuis rocheux

Un contrefort ou recharge rocheuse est essentiellement une mesure correctrice, mais dans certaines mines la mise en décharge des rebuts rocheux est faite en les disposant autour du barrage de stériles comme des contreforts ou appuis.

#### 4.2.6.7 Remblais d'amorce

La construction de remblais d'amorce en terre ou en enrochements fait l'objet de la section 4.3.

#### 4.2.7 Déchargement central de boues de stériles épaissies

Cette méthode consiste dans la construction pour le barrage d'un remblai de pied extérieur de forme approximativement circulaire. Les boues sont déchargées dans cet enclos au moyen d'un tuyau disposé à un point central du barrage. Le tuyau décharge verticalement vers le haut et est prolongé verticalement à mesure que le niveau des boues déposées croît en formant un tas. Il est nécessaire de décharger les boues à une densité extrêmement élevée atteignant 70% en poids. (La densité de boue est définie comme le rapport de la masse des solides à la masse des boues, multiplié par 100). Un tas de forme conique est ainsi développé avec ruissellement de l'eau excédentaire au long des talus et sa collecte au remblai de pied périphérique. Le sommet du barrage est par conséquent toujours en son centre.

#### 4.2.8 Techniques diverses

##### 4.2.8.1 Mise en dépôt dans la mer ou dans un lac

La mise en décharge des boues de stériles sous l'eau a été acceptée dans le passé comme une méthode valable. Cependant la tendance mondiale à la préservation de l'environnement rend cette pratique nettement moins attrayante.

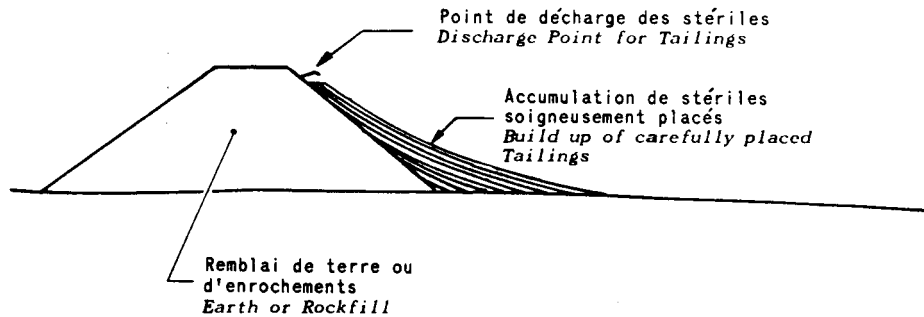


FIG. 4-21

Remblais de terre ou d'enrochement : Dépôt des stériles contre le remblai  
*Earth and rockfill walls : Deposition of tailings against wall*

#### 4.2.6.6 Rock Buttresses

The rock buttress is essentially a remedial measure but some mines dispose of waste rock by placing it round the tailings dam in the form of rock buttresses.

#### 4.2.6.7 Starter Walls

The use of earth and rockfill construction as starter walls is discussed in section 4.3.

#### 4.2.7 Central Discharge of Thickened Tailings Slurry

This method consists of the construction of an approximately circular outer toe wall for the dam and discharging the slurry into this area through a pipe located at the centre point of the dam. The pipe discharges vertically upwards and extends vertically upwards as the level of the deposited slurry grows in a heap. It is necessary to discharge the slurry at extremely high slurry densities approaching 70% density by weight (The slurry density is defined as the mass of solids divided by the mass of the slurry, multiplied by 100). A conical heap of tailings is developed in this way with excess water running down the slopes to be collected at the perimeter toe wall. The high point of the dam is, therefore, always at its centre.

#### 4.2.8 Miscellaneous Techniques

##### 4.2.8.1 Disposal into Sea or Lake

Disposal of tailings slurry under water has, in the past, been an accepted method of tailings deposition. However, the worldwide swing towards environmental control is making this practice less attractive.

#### 4.2.8.2 Mise en dépôt en souterrain

Les rejets miniers ont depuis longtemps été mis en dépôt en souterrain où ils servent à remplir des zones préalablement exploitées. Les objectifs du remplissage souterrain peuvent être l'un ou une combinaison des suivants :

- . économiser du volume et de la superficie d'emménagement à la surface;
- . fournir une plateforme de travail pour l'exploitation de gisements larges et massifs de minerai;
- . fournir un appui latéral pour des piliers souterrains augmentant ainsi leur capacité portante; ou
- . servir d'appui aux surplombs dans des mines profondes et de moyen d'absorption d'énergie libérée lors des travaux d'excavation miniers.

Selon le contexte minier, les stériles peuvent être pompés en place ou simplement introduits par gravité dans la zone de dépôt, ou encore le remplissage peut s'avérer une opération d'ingénierie bien contrôlée. Dans cette opération, les matériaux de remplissage, avec l'addition possible de quantités limitées de ciment Portland, sont mis en place à une teneur en eau contrôlée pour former un ensemble bien conçu de nervures. Le remplissage en souterrain a aussi été utilisé pour permettre l'extraction complète d'un gisement de minerai. L'excavation est réalisée en deux étapes. On excave en premier lieu une série d'ouvertures parallèles qu'on remplit ensuite avec des stériles. Ceux-ci en place, les piliers intermédiaires sont enlevés et le surplomb s'appuie dès lors sur le matériau de remplissage.

### 4.3 Remblais de pied et d'amorce

#### 4.3.1 Définitions

##### a) Remblai de pied

Le remblai de pied du barrage est habituellement un remblai de terre ou enrochements disposé de façon à fournir une extrémité nette et ordonnée au dépôt retenu. Parfois, le remblai de pied a une hauteur et un volume d'emménagement suffisants pour éviter un rythme initial excessif de montée dans des cas où les techniques "à enclos" ou "à ligne-robinet" sont utilisées.

##### b) Remblai d'amorce

Un remblai d'amorce est un remblai de terre élevé à une position intermédiaire à l'intérieur de la surface d'emprise du barrage. Cet ouvrage est souvent nécessaire pour l'établissement d'un amoncellement initial de gros stériles par les techniques de l'hydrocyclone. Il devra avoir une hauteur et un volume d'emménagement permettant le dépôt de stériles fins dans les phases initiales de la construction.



#### 4.2.8.2 Underground Disposal

Mine waste has for many years been disposed of underground where it is used to fill mined-out areas. The objectives of underground filling may be one or a combination of the following:

1. to save storage volume and area at the surface;
2. to provide a working platform for the mining of wide or massive ore bodies;
3. to provide lateral support for underground pillars thus increasing their load-bearing capacity; or
4. to support the hanging in deep mines and to act as a means of absorbing strain energy released from the mining excavations.

Depending on the mining situation, the tailings may be pumped into place or simply allowed to gravitate down dip into the area of deposition, or the filling may be a carefully controlled engineering operation. In this case the fill, possibly with the addition of controlled quantities of Portland cement, is placed at a carefully controlled water content, to form a designed pattern of supporting ribs. Underground filling has also been used to permit the complete extraction of an ore body. The mining is carried out in two stages. A series of parallel slots are first mined out, these are then filled with tailings, following which the intervening pillars are removed, the hanging being supported on the previously placed fill.

#### 4.3 Toe Walls and Starter Dams

##### 4.3.1 Definitions

###### a) Toe Wall

The toe wall of the dam is usually an earth or rockfill wall which is placed to provide a neat and orderly extremity to the impoundment. In certain cases, the toe wall will have sufficient height and storage volume to prevent excessive initial rates of rise where paddock or spigot techniques are being used.

###### b) Starter Wall

A starter wall is an earth wall formed at some intermediate position within the area of the dam. This wall is often necessary in order to establish an initial build-up of coarse tailings in cyclone techniques. It will have sufficient height and storage volume behind it to enable fine tailings deposition to take place in the initial stages of construction. In the upstream method of construction the starter wall is also the toe wall.

#### 4.3.2 Remblais de pied - Exigences constructives

Un remblai de pied tel que défini à la sous-section 4.3 ci-dessus n'a normalement aucun rôle structurel, bien qu'en certains cas cela devienne nécessaire. Dans les deux cas, le remblai de pied doit être construit avec une grande rigueur puisqu'il sera toujours exposé aux agents externes tels le vent, la pluie, etc., ainsi qu'à une percolation possible depuis les stériles de la retenue.

Le remblai de pied peut être du type imperméable étant donné qu'il est considéré conventionnel de placer des pertuis de drainage filtrants sous le remblai. Dans certains cas, une couche filtrante contre la face amont du remblai est également prévue, mais équipée de ses propres pertuis de fond. Si l'on utilise des enrochements pour la construction du remblai de pied, il est nécessaire d'appliquer sur les enrochements une couche filtrante inversée pour empêcher la migration des stériles du dépôt à travers les enrochements.

La face du remblai de pied exposée en permanence doit être protégée contre sa détérioration, au moyen d'enrochements, gazonnage ou autres types de protection.

#### 4.3.3 Barrages d'amorce - Exigences constructives

Un barrage d'amorce a un caractère temporaire, mais doit néanmoins être construit à un niveau élevé de résistance et de stabilité pour être assuré qu'il remplit sa fonction temporaire d'emmagasinement des stériles sans trop de percolation. Par conséquent, dans certaines limites, une rigueur de construction inférieure à celle exigée par un remblai de retenue d'eau est acceptable; mais il est nécessaire de s'assurer qu'il constituera, lorsqu'il sera complété, une composante adéquate de construction du barrage de stériles.

Tout en remplissant son rôle de barrage d'amorce, ce type d'ouvrage doit fonctionner comme une barrière empêchant la migration des stériles; il doit constituer une barrière efficace contre une percolation indésirable et il doit être capable de résister à la pleine pression des stériles sursaturés de l'amont. Le degré d'élaboration de la construction et l'effort de compactage requis pour un barrage d'amorce sont inférieurs à ceux qu'exige un remblai de pied, il s'agit d'une construction temporaire. Sa hauteur est fixée de manière à lui éviter d'être noyé et rompu par déversement.

#### 4.3.4 Nettoyage du terrain

Afin de s'assurer qu'aucune végétation ou aucun vide résultant de putréfaction organique ne seront présents dans la retenue d'un barrage, il est nécessaire d'enlever toute végétation, y compris si possible les racines et souches des zones de contact sous-jacentes aux remblais de pied, aux remblais principaux de retenue des stériles et aux remblais d'amorce. Si nécessaire, dans les zones à forte croissance végétale, des herbicides peuvent être pulvérisés après le nettoyage.

#### 4.3.2 Toe Walls - Construction Requirements

A toe wall as defined in 4.3 above does not normally have a structural function, although there may be cases where this is necessary. In either case the toe wall should be constructed to a relatively high standard as it will always be exposed to external weathering, as well as to possible seepage from the stored tailings material.

The toe wall may be of impervious construction as it is conventional to provide filter drain outlets under the wall. In certain cases a filter blanket against the upstream face of the wall is also provided but, again, with its own outlets placed under the wall. Should rockfill be used for the toe wall construction it would be necessary to place a reverse filter blanket against the rockfill to prevent migration of the stored tailings material through the rock (Fig. 4-18). The permanently exposed face of the toe wall must be protected against deterioration by rock cover, grassing or other suitable means.

#### 4.3.3 Starter Dams - Construction Requirements

A starter dam is a temporary facility, but must be built to adequate standards of strength and stability to ensure that it performs its temporary function of storing tailings without excessive seepage. Within limits a lower standard of construction is, therefore, acceptable than would be required for an embankment storing water, but it is necessary to ensure that it will form a structurally adequate component of the completed tailings dam.

While serving its purpose as a starter dam it must perform as a barrier against migration of tailings through it; it must be an effective barrier against undue seepage and it must be capable of resisting the full pressure of super-saturated tailings from upstream. The sophistication of construction and compaction effort required for the construction of the starter wall is lower than that required for a toe wall, as it is only a temporary structure. Its height is determined so as to prevent failure by overtopping during floods.

#### 4.3.4 Ground Clearing

To ensure that vegetation growth or voids from organic decay will not occur in the structural impoundment of any dam, it is necessary to clear all vegetation, including if possible roots and stumps, from the surface contact areas beneath toe walls, main tailings impounding walls and starter walls. If considered necessary in high vegetation growth areas, weed killer can be sprayed after clearing. This is particularly important under filter drains and linings.

#### 4.3.5 Matériaux de construction

La plupart des matériaux d'enrochements ou de sols conviendraient pour la construction des remblais de pied ou d'amorce. Il est évident que cet énoncé n'est pas sans limitations. Par exemple, si l'on employait uniquement des enrochements à gros éléments, l'ouvrage serait extrêmement poreux et permettrait une migration des stériles et de l'eau à travers le remblai. Si un tel matériau est employé, il sera nécessaire de placer sur la face amont, une couche d'un matériau relativement imperméable ou un filtre bien conçu de manière à empêcher toute percolation ou migration des stériles.

De la même manière, des argiles peuvent ne pas s'avérer convenables si des efforts extrêmes sont nécessaires pour leur mise en place et leur compactage.

La plupart des matériaux compris entre ces deux extrêmes conviendraient par ailleurs. Le compactage des matériaux en place est nécessaire pour obtenir une imperméabilité et une stabilité suffisantes lorsque le barrage est en charge durant la courte période de sa vie fonctionnelle.

Cependant on pourrait faire un compactage réduit par rapport à celui généralement exigé pour un barrage hydraulique conventionnel. Par exemple, dans le cas d'un barrage entièrement constitué d'enrochements, un compactage réduit serait suffisant.

Lorsque l'on cherche à réduire le tassement après construction, les enrochements en place doivent être arrosés à l'eau. Selon la nature des matériaux utilisés, un compactage à divers degrés et de divers types sera nécessaire pour obtenir la densité désirée.

#### 4.3.6 Hauteur et largeur

La hauteur d'un remblai de pied ou d'amorce est en général fixée par les exigences de conception de ce remblai, ce qui inclut des considérations telles que la possibilité de retenir le ruissellement d'averses, l'emménagement suffisant pour limiter le rythme de montée de la mise en dépôt initiale, etc. Ce sujet particulier est traité dans le chapitre intitulé "Conception" de ce manuel.

La largeur de crête d'un remblai à chaque étape de construction dépend de la largeur nécessaire pour la circulation en toute sécurité du matériel de remblayage et des exigences d'accès de l'exploitation.

Cette largeur, ainsi que les pentes latérales de conception déterminent la largeur définitive de la base du remblai. La pente latérale dépend des exigences de conception, en fonction du matériau utilisé. En ce cas aussi, il faut se référer au chapitre "Conception".

#### 4.3.5 Materials of Construction

Most rock or soil fill materials would be suitable for use in the formation of toe and starter dam walls. Obviously there are limitations to this statement. For instance, if coarse rockfill is used to form the wall this would be extremely porous and could allow migration of tailings and water through the wall. If this material is used, it would be necessary to place a layer of relatively impermeable material or an adequately designed filter on the upstream face to prevent seepage and migration of tailings. (See 4.2.6.2) Similarly, clays may be unsuitable if an extreme effort is required to place and compact them. Most materials between these two extremes would otherwise be suitable. Compaction of the placed materials is required in order to provide some degree of impermeability and structural stability when the wall is loaded for the short period of its structural life. However, reduced degrees of compaction over those normally applied to say a major dam for water supplies, could be applied. For instance, in the case of a pure rockfill wall very little compaction of the rockfill need be applied.

Where it is necessary to minimize post construction settlement the placed rockfill should be well sluiced with water. Depending on the nature of other materials that may have to be used, different degrees and types of compaction effort would be required to provide the required density.

#### 4.3.6 Height and Width

The height of a toe or starter dam wall is generally governed by the design requirements of that wall, which will include such considerations as stormwater run-off containment or storage to limit the rate of rise of initial tailings placement. This particular subject has been dealt with in the design section of the manual.

The top width is dependent upon the width required for safe movement of the particular earth building machinery being used and on operational access requirements. This width, and the designed side slopes, would determine the final base width of the walls. The side slope is governed by design requirements, taking cognisance of the material being used. Again, cross reference to the design section is required.

#### 4.4 Filtres drainants

##### 4.4.1 Localisation et implantation

Les filtres drainants seront implantés sur les dessins de construction d'après les informations tirées des photos aériennes ou de l'inspection des sites. Il arrive parfois qu'au début de la construction ces implantations doivent être adaptées pour satisfaire certaines conditions locales que l'inspection n'avait pas révélées. Par exemple, si une dépression du terrain se présente, empêchant l'écoulement par gravité de l'eau dans la tranchée ou si un affleurement rocheux empêche l'exécution d'une tranchée pour le filtre drainant, le drain devra être réimplanté. Il est toujours essentiel de reporter de telles déviations sur les dessins de construction.

##### 4.4.2 Choix des matériaux

La réussite d'un drain filtrant dépend en grande partie du choix et de l'utilisation correcte des matériaux retenus par sa réalisation. La courbe granulométrique est extrêmement importante et l'on devra bien s'assurer que les matériaux utilisés sont bien à l'intérieur du fuseau granulométrique de conception. On veillera à ne pas utiliser de matériaux pouvant se fragmenter et par la suite subir une modification de granulométrie, sous l'action de l'eau passant à travers le drain. Il en va de même pour l'attaque chimique par des effluents présents dans l'eau. Les matériaux utilisés doivent aussi avoir une résistance à la compression suffisante pour résister à leur auto-fragmentation sous charge lorsque des stériles sont déposés par dessus.

##### 4.4.3 Mise en place des matériaux

Le bon fonctionnement du drain exige une mise en place très soignée des matériaux. On veillera à empêcher le drain de se colmater par contamination du milieu drainant. Afin de s'assurer qu'une érosion excessive n'aura pas lieu et qu'une surconsolidation du drain ne se produira pas à la suite de son chargement, il est de bonne pratique de compacter les matériaux du filtre. La mise en place peut se faire à la main, à l'aide de matériel de terrassement ou de matériel spécial de mise en place.

##### 4.4.4 Recouvrement de drains par des stériles

Le procédé le plus important, permettant d'assurer le bon fonctionnement à long terme d'un filtre drainant dans un remblai de stériles, consiste à le recouvrir initialement par des matériaux de stériles. Si cette mise en place se fait sans précautions et de façon incontrôlée, causant ainsi son érosion ou son colmatage par des éléments fins, l'obturation du drain sera très probable.

#### 4.4 Filter Drainage

##### 4.4.1 Location and Alignment

Filter drains will have been located on the construction drawings on the basis of information gleaned from aerial photographs or site surveys. It is sometimes the case that when construction commences these locations must be amended to suit local conditions not revealed by the surveys. For instance, if there is a depression in the ground which would prevent a gravity flow of water in the trench or if there is rock outcropping which may prevent trenching for the filter drain, the drain would require realignment on site. It is always essential to record such deviations on the construction drawings.

##### 4.4.2 Selection of Materials

The success of a filter drain depends largely on the correct use and selection of materials for the construction of the drain.

Particle size grading of the materials is extremely important and care must be taken to ensure that the materials used fall well within the design envelopes of grading.

Care must be taken not to use materials which will degrade due to flow of water through the drain, or which will change composition due to chemical attack from any effluents that may be in the water. The materials used must also have an adequate compressive strength to resist their breakup under the loading when the tailings are placed over them.

##### 4.4.3 Placing of Materials

To ensure the ultimate successful performance of the drain, the placing of filter drainage materials must be carefully controlled on site. Care must be taken to avoid contamination of the drainage media during placing which could lead to eventual clogging of the drain. In order to ensure that excessive erosion does not take place and that further consolidation of the drain does not take place after loading, it is good practice to compact the filter materials.

Placing may be done by hand, earthmoving equipment or special placers and care must be exercised to avoid segregation.

##### 4.4.4 Covering of Drains with Tailings

The most important procedure for the successful long term functioning of a filter drain in a tailings dam, is the initial covering of the drain with tailings material. If this is careless or uncontrolled, thus causing erosion of the drain or allowing fine material to initially come into contact with the drain, clogging is likely to occur.

Il est recommandé de procéder à ce recouvrement des drains par des stériles assez tôt dans le déroulement des travaux. Ceci empêchera l'érosion due aux agents atmosphériques et permettra d'assurer la mise en place du matériau adéquat directement sur les drains.

Lorsque les drains s'élèvent au-dessus du terrain, leur protection contre tout dommage dû au ruissellement d'averses devra être prévue au moyen de bermes.

#### 4.4.5 Entretien des drains

Les filtres drainants exigent un entretien constant et soigné durant la période comprise entre leur construction et leur recouvrement par des stériles. Si possible on évitera des périodes d'exposition longues, en construisant les drains filtrants par étapes, seulement au moment de leur utilisation.

Des dommages peuvent être produits par divers agents, tels que:

- . l'érosion due au ruissellement de surface ou au vent;
- . l'érosion par concentration de l'eau de ruissellement dans une tranchée de drains souterrains ou au contact du drain et du terrain dans le cas d'un filtre drainant de surface;
- . l'érosion par déversement d'eau de ruissellement dans le cas d'un drain de surface;
- . le dépôt de silt fin sur la surface du drain par le vent, le ruissellement et l'eau stagnante;
- . les véhicules ou les animaux;
- . la croissance de la végétation.

Dans tous les cas de dommages, l'entretien et les réparations doivent être terminés avant le recouvrement des drains par les stériles. Le cas échéant, on veillera à la protection temporaire des filtres. Pour ce faire, on mettra en place soit des déversoirs en travers sur les drains pour leur protection contre les averses et le ruissellement subséquent, soit en construisant des canaux de dérivation ou des murs "bund".

Tout dépôt de silt accumulé à la surface du filtre empêchant l'entrée d'eau dans le drain doit être râclé et la couche filtrante doit être rétablie. Les dommages dus à l'érosion doivent être réparés à l'aide de matériaux filtrants ayant une granulométrie adéquate.

Toute végétation doit être enlevée, y compris les racines. Si nécessaire on utilisera un herbicide.



It is recommended that plans be made to ensure that the drains are covered with tailings at an early stage. This will prevent erosion from weathering and stormwater and will ensure that the correct material is placed directly on them in the first instance.

Where drains protrude above the ground, stormwater protection berms must be provided to prevent damage.

#### 4.4.5 Maintenance of Drains

Filter drains require constant and careful maintenance in the period between their initial construction and the covering of the drain with tailings material. If possible, periods of long exposure should be avoided by constructing filter drains in stages, just ahead of requirement for service.

Damage can be caused by various mechanisms, as follows:

- 1) Erosion from direct surface run-off or wind.
- 2) Erosion by channelling of stormwater into a subsurface filter drain trench, or along the drain/ground contact in the case of a surface filter drain.
- 3) Erosion by overtopping of stormwater run-off in the case of a surface drain.
- 4) Deposition of fine silt onto the surface of the drain by wind, stormwater or pool water.
- 5) Mechanical damage by vehicles or animals.
- 6) Vegetation growth.

In all cases of damage, maintenance and repair should be completed before the drain is covered with tailings. Temporary works must be constructed to protect filters. These will take the form of weir crossings over drains for stormwater and stormwater protection or diversion channels and bund walls. As previously pointed out (4.2.6.5) filters can be protected by the use of non-woven synthetic filter fabrics.

Fine silt deposits on the surface of the filter drain which would prevent the ingress of water into the drain must be skimmed off, and the filter layer reinstated. Erosion damage must be repaired using correctly graded filter material.

All vegetation must be removed, including roots. If necessary, weed killer must be applied.

#### 4.5 Systèmes d'évacuation

##### 4.5.1 Définitions

###### a) Déversoirs

Un déversoir est un organe installé sur un remblai ou sur le terrain naturel, ou sur le côté d'un barrage, à une cote choisie de telle façon qu'à mesure qu'augmente la hauteur du barrage, les eaux excédentaires de la retenue puissent être déversées par gravité.

###### b) Tours de décantation

Une tour de décantation consiste en une tour verticale dans une position telle qu'elle sera toujours dans l'eau de la retenue. Elle est connectée à un pertuis horizontal callé sous le remblai pour permettre le passage des effluents vers une station de pompage de récupération ou vers un cours d'eau naturel en aval. La tour de décantation est rehaussée verticalement, au rythme de la montée du niveau d'eau de la retenue, lorsque celle-ci est remplie. Le pertuis horizontal peut être endommagé par les tassements différentiels ou la déformation due à la tension. Il faut donc vérifier si les études exigent une attention particulière à ce genre de problème :

on veillera à ce que les pertuis horizontaux de décantation soient calés sur un matériau satisfaisant et à ce que des tassements différentiels ne viennent causer une rupture des ouvrages. La base d'une tour de décantation doit être fondée sur un matériau capable de résister aux forces élevées imposées sur la tour par les stériles avoisinants en cours de consolidation. Il est également très important de s'assurer que le tuyau a une résistance à la traction suffisante pour toutes les forces horizontales pouvant lui être appliquées; ces forces sont dues à la nature et à la configuration des amoncellements de stériles à mesure que le barrage se remplit.

###### c) Tour de décantation à flanc de coteau

Cet ouvrage est semblable par sa conception à une tour de décantation ordinaire, sauf qu'au lieu d'être verticale, elle est construite dans une position inclinée contre le terrain naturel et prolongée à mesure que le barrage s'élève.

###### d) Station de pompage flottante

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une station de pompage située dans la retenue d'un barrage de stériles, dont le but est l'épuisement par pompage des eaux excédentaires de la retenue. La tuyauterie de décharge peut être montée sur un portique dont la hauteur peut être augmentée au-fur-et-à-mesure de la montée du niveau de la retenue, ou encore sur une série de flotteurs distribués à travers la retenue et la plage. La barge peut être ancrée ou attachée. Le tuyau de décharge est pourvu de sections flexibles lui permettant de s'ajuster aux variations du niveau d'eau dans la retenue.

#### 4.5 Effluent Systems

##### 4.5.1 Definitions

###### a) Spillways

A spillway is a provision made in the wall or on natural ground at the flank of the dam at suitable levels, so that as the dam rises, the gravity discharge of excess water out of the ponded area of the dam is allowed.

###### b) Decant Towers

A decant tower consists of a vertical tower placed in such a position as to always be in contact with the water pond. It is connected to a horizontal outlet pipe running beneath the dam to allow discharge to a recovery pumpstation or to a natural stream below the dam. The decant tower is extended vertically, in time with the rise of pond level, as the dam is filled. The horizontal outlet pipe is liable to damage by differential settlement and tensile strain. Check on special provision that may be called for in the design.

Care must be taken to ensure that horizontal decant pipes are founded on competent material and that differential settlements will not give rise to failures. The decant tower base must be founded on material which can withstand the extremely high downward force on the tower developed by down drag of consolidating tailings. It is also most important to ensure that the pipe has a tensile strength sufficient to resist any horizontal forces that may be imposed upon it due to the nature and configuration of the consolidating tailings as the dam fills, and to seismic effects.

###### c) Hillside Riser Decant

This is similar to a decant tower in concept, but instead of standing vertically it lies in a sloping position against the natural ground. It is extended up grade as the dam level rises.

###### d) Floating Pump Barge

This is, as its name describes, a floating pumpstation which is located on the tailings dam pond and is used to remove excess water from the pond by pumping. The discharge pipelines would either be located on a pipe gantry which is extendible vertically as the pond rises, or on a series of floats extending across the pond and beach. The pump barge is anchored or moored. The discharge main is fitted with flexible sections so that it can adjust to variations of water level in the dam.

#### e) Syphons

Un syphon est un système servant à l'épuisement des eaux excédentaires de la retenue d'un barrage de stériles selon le principe même du syphon. L'entrée du tuyau est située dans la retenue sur des flotteurs et le tuyau monte à pleine largeur de la plage à l'amont du barrage et sur le remblai de stériles, pour ensuite décharger vers un bassin collecteur ou vers un cours d'eau à l'aval du remblai. Ce tuyau est pourvu à son point le plus élevé d'une pompe à vide avec une valve de contrôle dans son tronçon de décharge.

#### 4.5.2 Exigences de construction

Les organes d'évacuation des eaux excédentaires constituent des éléments extrêmement importants de tout barrage de stériles. Leur rupture ou leur indisponibilité entraînerait un rehaussement du niveau de retenue pouvant conduire à un arrêt de l'installation. Il est nécessaire par conséquent de construire ces organes selon les normes les plus sévères et en exacte conformité avec les exigences de conception.

Les déversoirs risquent particulièrement d'être érodés sous l'action des débits de crues. Leur construction doit satisfaire aux normes les plus sévères, particulièrement lorsque le déversoir est situé au-dessus ou au voisinage de stériles très érodables.

Quand on procède à l'exhaussement d'une tour de décantation avec des anneaux de béton ou des planches à déversement ou par tout autre moyen, on veillera à bien observer le cahier des charges pour cette tour de manière à éviter toute rupture due à une erreur de construction. A titre d'exemple, on peut citer le cas d'un mauvais joint entre des éléments préfabriqués successifs; il faut souligner à nouveau qu'une fois un organe de décantation enterré sous des stériles, il ne sera plus facile d'y accéder pour des réparations et la nécessité de sévères normes de construction s'impose.

Il en est de même des ouvrages de décantation à flanc de coteau où les entrées sont obturées au moyen de planches bouchons à mesure que monte le niveau d'eau. En ce cas-ci également, les plus grandes précautions seront nécessaires pour s'assurer que les planches ont été adéquatement fabriquées, en stricte conformité avec le devis et qu'elles sont mises en place correctement.

#### 4.5.3 Exigences d'exploitation

Un organe du type déversoir doit être soigneusement entretenu pendant les phases d'exploitation. En général ce type d'organe doit être remis en bonne position à plusieurs reprises à mesure que le

#### e) Syphon Pipes

A syphon pipe is a system for removing excess water from the tailings dam pond by syphoning action. The inlet end of the pipe is located in the water pond on floats and the pipe rises up across the beach on the dam and over the tailings wall to discharge to the collection pond or stream below the dam wall. Such a pipe is conventionally serviced with a vacuum pump at its crest and would have a control valve on the discharge leg of the line.

#### 4.5.2 Construction Requirements

Provisions for extraction of excess water are extremely important in any tailings dam. Their failure could give rise to storage levels in the dam which, in turn, could cause a total plant shutdown. It is therefore necessary to construct these facilities to the highest standard and exactly in accordance with the design requirements.

Spillways are prone to erosion damage under high flood flows and the construction must be of the highest standard particularly where the spillway is located on or near the highly erodable tailings material.

When extending decant towers with concrete rings or weir planks or whatever means are used, care must be taken to comply with the design specifications for that particular tower in order to ensure that failures will not occur due to poor construction.

For example, inadequate sealing between successive precast elements. It is again stressed that once a decant facility is buried beneath tailings material there will be no easy access to it for repairs and the necessity for high standards of construction is emphasized.

The same would apply to hillside riser type decants where the inlets are sealed by wedged planks as the water level rises. Here again great care must be taken to ensure that the planks are of adequate construction, made strictly in accordance with the specification and that they are installed competently.

#### 4.5.3 Operating Requirements

A spillway type outlet must be carefully maintained during the operational phase. Generally this type of decant will have to be relocated with time as the water level rises. Each new spillway

niveau d'eau monte. Chaque nouveau déversoir doit être construit avec les mêmes normes que le premier et les déversoirs hors d'usage doivent être obturés conformément aux méthodes recommandées. Ces méthodes doivent être planifiées de façon à ce qu'il ne reste aucune faiblesse dans le remblai.

Le déversement par gravité est en règle générale une opération très simple qui requiert néanmoins beaucoup d'attention durant les phases d'exploitation pour assurer son bon fonctionnement continu. Par exemple, les tours verticales ont des organes de décantation qui exigent une construction soignée au rythme de la montée du plan d'eau pour assurer leur verticalité et leur étanchéité. On prendra toutes les précautions pour que les devis soient observés en tous points, durant la phase d'exploitation.

Il faut à nouveau souligner que l'organe de décantation de tout barrage de stériles est un élément essentiel et que sa rupture ou toute autre mise hors d'usage entraînerait l'arrêt des opérations non seulement au barrage, mais aussi à l'usine d'où proviennent les stériles. Ainsi les procédés et méthodes s'appliquant aux ouvrages de décantation doivent obéir aux normes les plus sévères.

Les organes de décantation par pompage doivent être conçus, construits et entretenus en conformité avec les normes les plus sévères pour permettre leur opération avec un temps minimum d'arrêt et la disponibilité à tout moment d'un système continu et fiable d'épuisement des eaux excédentaires.

#### 4.5.4 Gestion de la retenue et de la plage

A moins de mesures spécifiques lors de la conception, un barrage de stériles ne doit pas servir à emmagasiner de l'eau. Le niveau du bassin doit être maintenu à un minimum compatible avec les objectifs suivants:

- (i) l'entrée de l'organe de décantation est toujours submergée;
- (ii) l'eau qui monte dans l'organe de décantation doit être exempte de solides en suspension;
- (iii) le maintien d'une revanche minimale entre le niveau d'eau du bassin et le point le plus haut de la plage de stériles, tel que conçu;
- (iv) observation des exigences concernant les pertes par évaporation si cela s'avère essentiel pour le bilan hydrique de l'usine;
- (v) contrôle de la percolation vers l'aval et maintien de la nappe phréatique interne. Plus le niveau d'eau du bassin sera élevé, plus grande sera la différence produisant les débits de percolation au pied aval du barrage.

#### 4.5.5 Entretien

Il faut souligner le besoin de normes sévères d'entretien de toutes les parties d'un système à effluents.

must be built to the same standards as the original and old spillways must be closed down in accordance with the recommended procedures. These procedures must be planned in such a way that they will leave no weaknesses in the dam wall.

The gravity decant is generally a very simple operation but nevertheless requires careful attention during the operational phase so as to ensure its continued successful operation. Care must be taken to comply with the design specification in every respect during the operational phase.

It must be emphasised again that the decant facility in any tailings dam is an essential feature and its failure could give rise to closure of the tailings dam and the process plant feeding the tailings dam. Operational procedures for decant facilities must be of the highest standard.

Pumped decant facilities must be designed, constructed and maintained to the highest standards to ensure that they operate with the minimum of downtime and to ensure that a continuous and reliable means of removing water from the dam is always available.

#### 4.5.4 Pond and Beach Management

Unless specific provision is made at the design stage, a tailings dam should not be used for the storage of water. The pond level should be maintained at a minimum consistent with the following objectives:

- (I) Decant facility inlet must always be submerged.
- (II) Water flowing into decant to be free of suspended solids
- (III) Minimum stormwater freeboard between pond level and head of beach to be maintained, as stipulated by the design
- (IV) Evaporation loss requirements to be met if this is essential for the plant water balance
- (V) Control of downstream seepage and internal water table to be maintained. The higher the pond level, the greater will be the head causing seepage from the toe of the dam and also reduction of the stability safety factor.

#### 4.5.5 Maintenance

The need for a high level of maintenance of all components of the effluent system must be stressed.

#### 4.6 Surveillance des barrages de stériles pendant la construction

##### 4.6.1 Mesures correctrices préalables à la mise en dépôt

L'exploration du site d'un barrage de stériles est habituellement réalisée au commencement de la phase conceptuelle. En se basant sur les informations obtenues durant cette exploration, certaines hypothèses de conception sont avancées et la conception se base sur ces mêmes hypothèses. Pendant la phase de construction, il arrive souvent que la séquence de construction dévoile certaines informations additionnelles qui peuvent affecter les hypothèses de base. En de tels cas, l'équipe de construction doit décider des méthodes appropriées pour corriger les détails de conception. Ces décisions doivent toujours être prises en connaissance de cause et en parfaite compréhension du rôle assigné à la composante en question. Ce point fait l'objet de discussion aux sections 4.3.5 et 4.4.1.

##### 4.6.2 Surveillance de la stabilité et de la percolation

La stabilité d'un barrage construit entièrement avec des stériles dépend de certaines hypothèses avancées lors de la conception. Les plus importantes de ces hypothèses ont trait au niveau et à la position de la nappe phréatique ou ligne de percolation à l'intérieur du barrage, au fonctionnement du système de drainage sous-jacent, au revêtement (si présent) et au profil selon la profondeur des résistances au cisaillement dans le cas de barrages construits avec des stériles.

###### 4.6.2.1 Inspections

Des inspections régulières de l'état des talus des barrages de stériles constituent une partie essentielle de tout programme de surveillance. Pendant ces inspections visuelles, une attention particulière doit être portée sur les aspects suivants:

- a) la présence de fissures parallèles ou transversales à la ligne de crête des talus ou la présence de fissures sur les talus proprement dits;
- b) la présence de fissures dans les sols au pied des talus et toute déformation (horizontale ou verticale) des tranchées de drainage aux pieds des talus;
- c) tout affaissement de la ligne de crête des talus ou gonflement au pied des talus;
- d) l'émergence de débits de percolation au pied d'un talus. Ceci serait révélé par l'humidité de la surface, par une concentration locale de végétation ou par une érosion excessive de la surface du talus.

L'apparition de l'un de ces signes avertisseurs est une indication très marquée de l'instabilité du talus et requiert de ce fait des mesures correctives.



#### 4.6 Monitoring of Tailings Dams During Construction

##### 4.6.1 Predeposition Remedial Measures

Site exploration of a potential tailings dam is conventionally made at the commencement of the design stage of the dam. Based on the information gleaned during this investigation certain design assumptions are made and the design proceeds according to these assumptions. During the construction phase it is often the case that the construction sequence exposes certain additional information which may have an effect on the design assumptions. In these cases, decisions must be taken by the construction team to amend the design details. These decisions must always be taken with a knowledge and understanding of the intended function of the item in question. Sections 4.3.5 and 4.4.1 discuss this point in more detail.

##### 4.6.2 Monitoring for Stability and Seepage

The stability of a tailings dam constructed entirely with tailings depends on certain assumptions made during its design. The most important of these assumptions relate to the level and position of the phreatic or seepage surface within the dam, to the functioning of the under-drainage system and the liner (if present) and to the profile of shear strength with depth.

###### 4.6.2.1 Inspections

Regular inspections of the condition of the slopes of tailings dams form an essential part of any monitoring program. During these visual inspections particular attention should be paid to the following:

- a) The presence of cracks parallel to or transverse to the crest of the slopes or the presence of cracks on the slopes themselves;
- b) The presence of cracks in the soil at the toe of the slope and any visible displacement (either horizontally or vertically) of solution or drainage trenches at the toes of the slopes;
- c) Any visible sagging of the crest of the slope or bulging at the toe of the slope;
- d) The visible emergence of seepage at the toe of the slope. This would be indicated by wetness of the surface, local concentrations of plant growth or excessive erosion of the slope surface.

The appearance of any of these warning signs is a strong indication that the slope may be unstable and that remedial measures may be necessary.

#### 4.6.2.2 Surfaces de percolation

La hauteur et la position des surfaces de percolation peuvent être observées au moyen de piézomètres à simple tuyau vertical, tels que montrés dans la Fig. 4-22. Il est généralement indiqué d'installer ce type de piézomètre lorsque le barrage aura atteint une certaine hauteur. Les tuyaux peuvent alors être prolongés si nécessaire en ajoutant des sections de tubage à la surface pour augmenter leur hauteur. Les piézomètres sont habituellement installés dans un plan normal au talus du barrage à des endroits critiques du point de vue de la stabilité. Un nombre suffisant de ces piézomètres doit être installé pour permettre la mesure exacte de la surface de percolation (cf Fig. 4-23) et pour connaître certains points critiques de cette surface, tel que le sommet de la surface de percolation voisine des drains de base. Les piézomètres doivent être installés à des endroits d'accès rapide et facile à chaque instant. Des emplacements convenables seraient, entre autres, les remblais de division ou des points élevés semblables.

Il existe d'autres types de piézomètres en variante aux piézomètres à tuyaux verticaux. Par exemple, les piézomètres hydrauliques à tubes jumelés, les piézomètres pneumatiques, à corde vibrante et à diaphragme-extensomètre peuvent en certains cas mieux convenir pour des applications spécifiques.

#### 4.6.2.3 Percolation à travers les revêtements

Le fonctionnement du système de drainage de pied d'un barrage, ou des drains collecteurs installés en-dessous d'un revêtement peut être suivi en mesurant la vitesse de décharge qui doit s'accorder assez bien avec la quantité déchargée. Des puits de surveillance sur la périphérie d'un barrage revêtu (cf Fig. 4-24) traversant la nappe phréatique peuvent aussi être utilisés pour suivre l'évolution de l'efficacité d'un revêtement. Le débit (effluent) des drains collecteurs ainsi que des échantillons prélevés dans les puits de surveillance doivent être vérifiés pour s'assurer que la qualité de l'eau souterraine n'est pas affectée par la présence du dépôt de résidus. Si pour une raison quelconque la surveillance indique que le revêtement n'est pas efficace, il peut être nécessaire de construire un parafouille vertical ou encore un mur drainant en périphérie du barrage de stériles. L'installation de tels moyens exige une ré-évaluation complète de la stabilité de l'ouvrage; particulièrement dans le cas d'un parafouille, les niveaux de l'eau dans les couches des fondations seront affectés. Parfois, il est nécessaire de s'assurer qu'il n'y a aucune percolation depuis le barrage de stériles vers le système d'eaux souterraines. En de tels cas, il est essentiel d'empêcher la percolation en déposant les stériles sur un revêtement imperméable préparé à l'avance et réalisé avec de l'argile compactée ou des feuilles imperméables synthétiques telles que le caoutchouc de butyle ou d'autres produits efficaces.

#### 4.6.2.4 Profils de résistance et densité relative

Dans le contexte de ce manuel, le mot "profil" désigne les valeurs de résistance ou de densité relative dans un domaine défini par

#### 4.6.2.2 Seepage Surfaces

The height and position of seepage surfaces must be observed by means of piezometers, such as those shown in Figure 4-22. It is usually convenient to install stand-pipe piezometers once the dam has reached a certain height. The stand-pipes can then be extended if 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 critical points for stability. A sufficient number of stand-pipes must be installed to enable the seepage surface to be determined accurately, as illustrated in Figure 4-23, and to pick up certain critical points on the surface such as the height of the seepage surface adjacent to under-drains, etc. Stand-pipes should be installed in positions where they will be readily accessible at all times. Suitable locations would be on dividing walls or similar prominences.

As an alternative to stand-pipe piezometers, several other types are available. For example, twin-tube hydraulic piezometers, pneumatic piezometers, vibrating wire and strain-gauged diaphragm piezometers may be more suitable for specific applications. They use horizontal connections and avoid difficulties of maintaining vertical tubes during construction.

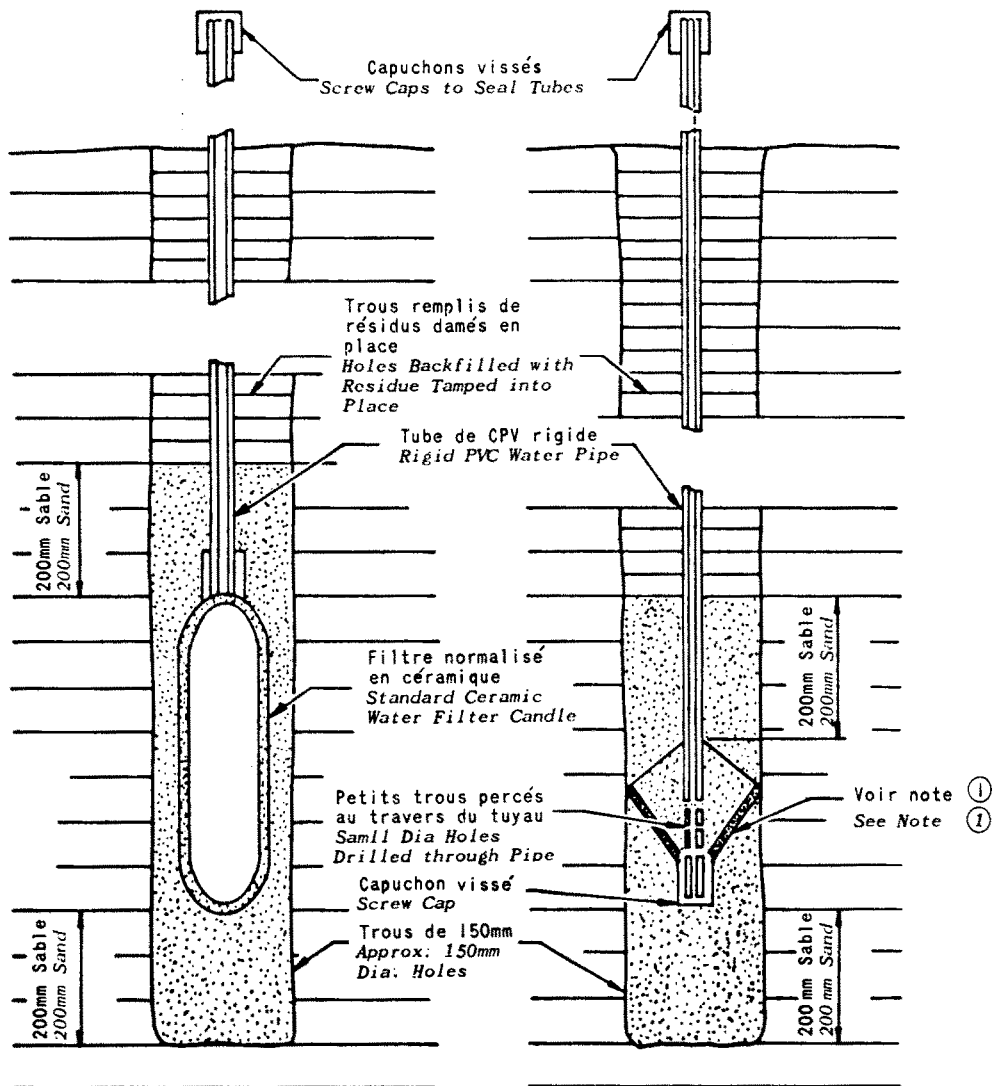
#### 4.6.2.3 Seepage through Liners

The functioning of the under-drainage of a dam, or collector drains installed beneath a liner can be monitored by measuring the rate of discharge which should agree reasonably well with the calculated quantity of discharge. Monitor wells around the perimeter of a lined dam, as illustrated in Fig. 4-24, penetrating the water table can also be used to monitor the effectiveness of a liner. The effluent from collector drains and samples taken from monitor wells should both be checked to ensure that the quality of the groundwater is not being unduly affected by the presence of the residue deposit. If for some reason the monitoring procedure shows that the liner is not effective, it may be necessary to construct a vertical cut-off or else a relief wall drain around the tailings dam. The installation of such measures will require the complete reappraisal of the stability of the dam, as, particularly in the case of a cutoff wall, the water levels in the foundation strata will be affected.

It is sometimes necessary to ensure that there is no seepage whatever from the tailings dam into the groundwater system. In such cases it is essential to prevent seepage by depositing the tailings on a prepared impervious liner of compacted clay or of an impervious synthetic sheeting such as butyl rubber or some other effective sealer.

#### 4.6.2.4 Profiles of Strength and Relative Density

In this context "profile" signifies the values of strength or relative density over a physical range defined by the designers as a critical spectrum to ensure the stability of the structure.



- Note ① - Entonnoir domestique en plastique avec bec coupé, tiré sur le tube. L'entonnoir rempli de sable avant sa descente dans le trou.
- NOTE ① - Domestic plastic funnel with stem cut off and pulled over pipe. Funnel filled with sand before lowering into hole.

FIG. 4-22

Piezomètres pour dépôts de stériles  
 Stand-pipe piezometers suitable for installing in tailings deposits

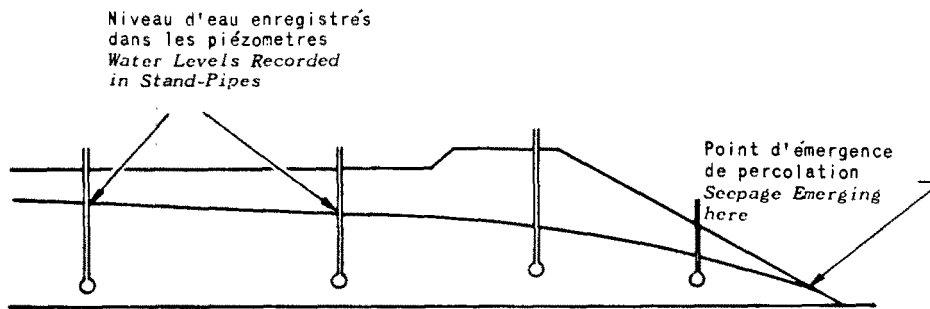


FIG. 4-23

Nappe type de percolation déterminée au moyen de piézomètres  
Typical seepage surface determined by means of stand-pipe piezometers

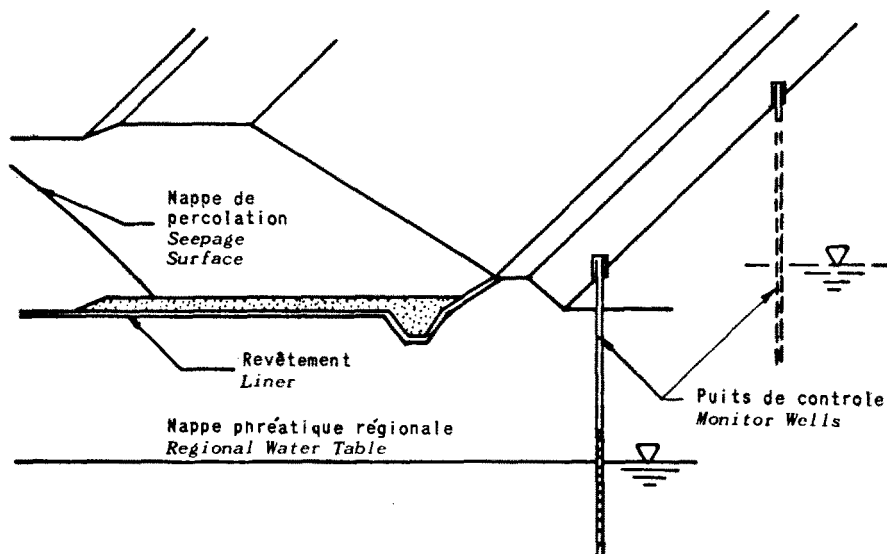


FIG. 4-24

Puits de contrôle installés sur la périphérie d'un barrage de stériles revêtu  
Monitoring wells installed around the perimeter of a lined residue dam

les projeteurs comme étant celui nécessaire pour que la stabilité de l'ouvrage soit assurée.

Le profil de résistance du matériau constituant d'un remblai est le mieux suivi par la réalisation d'essais de cisaillement in-situ dès que trois à cinq mètres de matériau se seront accumulés dans le dépôt. Au même temps, des essais peuvent être réalisés pour établir les profils de densité relative. Les résultats de ces essais in-situ peuvent alors être comparés aux conditions admises dans le projet et le talus du barrage peut être ajusté, si nécessaire.

Il existe différentes méthodes pour les essais de cisaillement in-situ. Le scissomètre (shear vane), le pénétromètre à cône piézométrique, le pressiomètre et le test de pénétration standard (SPT) ont tous été utilisés avec succès pour établir les profils de résistance. Le pénétromètre et le SPT peuvent être utilisés pour déterminer des densités relatives. Quels que soient les essais choisis, ils doivent être exécutés sous la surveillance de l'ingénieur géotechnicien qui interprétera finalement les résultats et vérifiera la stabilité du barrage.

#### 4.6.2.5 Surveillance par levé topographique

On peut utiliser des méthodes topographiques pour surveiller les barrages de stériles. La méthode la plus simple utilise une ligne de bornes longeant le pied du talus. Ces bornes sont alignées et nivelées au cours de leur installation. Par la suite, on procède à des observations périodiques de l'alignement et du nivellement. Les déformations verticales ou horizontales de n'importe quelle borne indiqueraient le développement dans le talus d'une instabilité par cisaillement.

Une ligne semblable de bornes pourrait être installée sur une risberme à une cote intermédiaire du talus d'un dépôt de résidus.

Une instrumentation plus complexe, par exemple des indicateurs de pente, peut aussi être installée pour suivre l'évolution des déformations des talus.

#### 4.6.3 Enregistrements

##### 4.6.3.1 Généralités

Il est essentiel de maintenir des enregistrements exacts pendant la construction d'un barrage de stériles. Ils serviront à l'appui de la surveillance et fourniront les renseignements les plus fiables sur le comportement du barrage. Si une rupture se produit, que ce soit dans le barrage lui-même, son revêtement d'étanchéité, les dispositifs de contrôle de la pollution ou autres, l'exactitude des enregistrements sera contrôlée et permettra d'en arriver probablement à une évaluation correcte des facteurs qui ont causé la rupture.

Un jeu complet de dessins d'exécution montrant les méthodes de mise en place doit être maintenu à jour, "tel que réalisé".

The strength profile of the material constituting a dam wall is best monitored by performing in-situ shear tests after three to five metres of material have accumulated in the deposit. At the same time tests can be performed to establish relative density profiles. The results of these in-situ tests can then be compared with conditions assumed for the design and the slope of the tailings dam can, if necessary, be amended accordingly.

Several methods are available for in-situ shear testing. The shear vane, piezometer cone penetrometer, pressure meter and standard penetration test have all been used successfully to establish profiles of strength. The cone penetrometer and standard penetration test can be used to establish relative densities. Whatever tests are chosen should be performed under the careful supervision of the geotechnical engineer who will ultimately interpret the results and check the stability of the dam.

#### 4.6.2.5 Monitoring by Survey

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

More complex instrumentation, e.g. slope indicators, may also be installed to monitor the movement of slopes.

#### 4.6.3 Records

##### 4.6.3.1 General

It is essential that accurate records be kept during the construction of a tailings dam. They will be used for back-up monitoring of the dam and will provide vital evidence of the performance of the dam. If a failure does occur, whether it be the dam itself, the liner, other pollution control measures or whatever, the accuracy of the record keeping will be tested to the full, leading probably to the correct assessment of factors leading to failure.

A complete set of "as built" working drawings and the pre-deposition and tailings placement design drawings should be kept on hand at all times.

#### 4.6.3.2 Tonnage livré

Une mesure exacte et l'enregistrement du tonnage permettra de faire de bonnes prédictions sur la vie d'un barrage et la montée d'un remblai. De tels enregistrements sont aussi essentiels aux calculs aux fins de paiement de l'entrepreneur qui construit le barrage. En de nombreux cas, l'exploitant doit maintenir un enregistrement horaire des points de livraison des stériles.

#### 4.6.3.3 Enregistrements volumétriques et de niveau

Les calculs volumétriques et de niveau faits à partir de levés topographiques doivent être enregistrés et vérifiés en regard des hypothèses de conception. Dans certains pays, un relevé annuel des barrages de stériles, accompagné de prévisions des cotes à atteindre, est exigé par les autorités compétentes.

#### 4.6.3.4 Enregistrements des débits (effluent)

L'enregistrement des débits (effluents) peut également constituer une exigence réglementaire ou être utilisé seulement comme source empirique d'information complémentaire.

##### a) Drains

Les enregistrements de la valeur des débits de drainage sont une bonne indication de l'efficacité du système de drainage de pied. Ils fournissent aussi des informations vitales pour résoudre tout problème pouvant se présenter, pourvu que la surveillance soit bien faite.

##### b) Retour d'eau de retenue

Chaque fois que cela sera possible, les mesures de l'eau restituée à la retenue ou rejetée devront être enregistrées. Les enregistrements constituent un outil important de direction et de conception.

##### c) Pollution

Lorsque la pollution de l'air, de l'eau de surface ou souterraine devient possible, la mesure de cette pollution doit être effectuée et les valeurs enregistrées. Des exigences minimales pour les mesures font souvent l'objet de législation.

##### d) Surface de percolation

De tous les enregistrements à maintenir, les relevés piézométriques sont les plus importants. Ils indiquent les niveaux de la surface de percolation, laquelle est en rapport direct avec la stabilité d'un barrage de stériles. Les lectures doivent être faites à intervalles réguliers et portées sur des coupes à échelle du barrage. Toute augmentation au voisinage ou au-delà des limites de conception doit être expliquée. Voir la section 4.6.1.2.



#### 4.6.3.2 Delivered Tonnages

An accurate measurement and recording of measured tonnages will allow good forecasts of dam life and wall growth to be made. Such records are also essential to calculate payment when a contractor is constructing the dam. In many cases, the operator should keep an hourly record of where the tailings have been delivered.

#### 4.6.3.3 Volumetric/Level Records

Volumetric and level determinations from survey data should be recorded and checked against design predictions. In some countries, a yearly survey of the tailings dam has to be made and presented to the relevant authority, together with future predictions of heights.

#### 4.6.3.4 Effluent Records

Effluent records may again be a statutory requirement or only used as empirical back-up.

##### a) Drains

Records of drain outflow performance is a good indication of the efficiency of the underdrainage system. It will also give vital information on problems developing if monitored correctly.

##### b) Pond Return Water

Wherever possible, measurements of pond water returned or disposed of should be recorded. Records form an important management and design tool.

##### c) Pollution

When pollution of any of the air, surface water or groundwater is possible, measurement of this pollution must be taken and records kept. Minimum standards of measurement are often legislated for.

##### d) Phreatic Surface

Of all the records that should be kept, the piezometric records are the most important. They indicate the level of the phreatic surface, which bears directly on the stability of the tailings dam. Readings should be taken at regular intervals and then plotted on scale sections of the dam. Any increases beyond or approaching design limits should be investigated. See section 4.6.1.2.

e) Autres enregistrements

Des techniques spécifiques de construction de remblais peuvent exiger d'autres enregistrements (par exemple, le fractionnement et la performance d'un hydrocyclone).

4.6.3.5 Construction de remblais

Dans certaines méthodes de construction de remblais, des techniques de mesures sophistiquées peuvent être exigées. Les cadences de construction peuvent être réglées en fonction de ces enregistrements (par exemple, les piézomètres).

4.6.4 Entretien général

L'entretien de tout ouvrage constitue un poste budgétaire fort nécessaire, bien que cher. Les barrages de stériles doivent être conçus pour un minimum d'entretien. Non seulement ils sont habituellement situés dans un endroit éloigné de l'usine, mais soumis à des conditions d'environnement et situés en-bas de l'échelle des priorités du directeur de l'usine.

4.6.4.1 Tranchées à effluent

Les tranchées à effluent doivent être maintenues exemptes de mauvaises herbes et de roseaux qui empêchent l'écoulement. De même, les sédiments provenant de l'érosion doivent être enlevés périodiquement.

Lorsque ces tranchées sont revêtues, l'entretien se fait à un niveau de traitement plus élevé, c'est-à-dire qu'il prévient la percolation et les dommages excessifs.

4.6.4.2 Enclos de ruissellement (Runoff paddocks)

Dans les régions à fortes précipitations, on construit des enclos de ruissellement sur la périphérie de pied du remblai d'emmagasinement pour capter les stériles d'érosion pour dépôt, ainsi que l'eau de ruissellement. A mesure que les enclos se remplissent, les remblais de retenue doivent être rehaussés, alors que les organes de décantation d'eau exigent aussi leur rehaussement.

4.6.4.3 Systèmes de contrôle d'effluent

Une quantité élevée des effluents d'un barrage de stériles peut restituer aux systèmes de pompage ou aux cours d'eau un pourcentage de solides de nature nocive en suspension. Tout système de contrôle d'effluent construit dans le but de permettre le dépôt de ces fins doit être nettoyé périodiquement.

4.6.4.4 Routes d'accès

Les problèmes inhérents à un barrage de stériles se produisent invariablement à l'occasion de mauvaises conditions météorologiques. Il est par conséquent très important de maintenir les routes d'accès en bon état; en fait, il convient en tout premier lieu de bien les construire.

e) Other Records

Specific wall building techniques may require other records to be kept (e.g. cyclone split and performance).

4.6.3.5 Wall Building

In certain construction methods used for wall building, sophisticated measurement techniques may be required. Rates of construction will be controlled by reference to these records (e.g. piezometers).

4.6.4 General Maintenance

Maintenance of any facility is a very necessary but costly item. Tailings dams should be designed for the minimum of maintenance. Not only are they usually situated at a site remote from the plant, they are open to environmental conditions and feature low on the plant manager's priorities.

4.6.4.1 Effluent Trenches

Effluent trenches should at all times be kept free of weed or reed growth that inhibits flow. Similarly, erosion sediments should be periodically removed.

Where these trenches are lined, maintenance would generally be of a far higher order, to prevent leakage and excessive damage occurring.

4.6.4.2 Run-off Paddocks

In areas of high rainfall, run-off paddocks are provided around the toe of the impoundment embankment to catch both the eroded tailings for settlement and the run-off water. As they fill, the containment walls will require heightening, while decants for the water may also require heightening.

4.6.4.3 Effluent Control Systems

Much of the effluent from a tailings dam may carry a percentage of suspended solids, deleterious in nature to return pump facilities or the stream. Any effluent control system built to settle out such fines will need to be cleaned out periodically.

4.6.4.4 Access Roads

Problems on a tailings dam invariably occur in the worst weather. It is thus an important requirement to maintain access roads, in fact to build them in the first place, in good condition.

#### 4.6.4.5 Conduites d'amenée (pipelines)

Il est essentiel de procéder à des inspections régulières des conduites de stériles afin de prévenir et empêcher toute forme de pollution due à des ruptures, et de permettre des remplacements en temps opportun.

En cherchant à réduire les coûts d'entretien, des coûts plus élevés d'immobilisations peuvent s'avérer avantageux: par exemple, l'utilisation de tuyaux d'acier revêtus de caoutchouc ou de polyuréthane ou de tuyaux en plastique.

#### 4.6.4.6 Robinetterie

La mise en dépôt est contrôlée par des robinets qui tendent à devenir le centre des activités de l'exploitant. Une fois le robinet le plus approprié identifié, des inspections régulières ainsi qu'un entretien suivi sont essentiels pour en assurer le suivi.

### 4.7 Mesures correctives

#### 4.7.1 Généralités

Quelques problèmes majeurs peuvent se présenter dans un barrage de stériles nécessitant des mesures correctives spécifiques autres qu'un entretien de routine. Les plus sérieux d'entre-eux peuvent être groupés comme suit:

##### a) Déversement

De simples déversements peuvent se produire dès que le niveau de la retenue monte au niveau du remblai avec écoulement d'eau par-dessus sa crête. Ceci ne devrait jamais se produire si des consignes adéquates d'exploitation ont été observées en vue de maintenir une revanche appropriée, même en cas de précipitation anormale, avec la disponibilité d'une conduite forcée efficace ou un système de décantation destinés au passage des eaux excédentaires.

Cependant, si un tel déversement se produit, le matériau de remplissage est érodé et forme une coulée dont l'importance dépendra du volume de déversement et de l'érodabilité du matériau.

##### b) Érosion de surface

Les talus exposés d'un barrage de stériles présentent une surface considérable de captage des précipitations et le ruissellement qui en résulte tend à y creuser des coulées. De telles coulées peuvent aussi résulter d'un éventuel déversement de stériles par-dessus le remblai. Lorsque le matériau stérile des talus possède une résistance relativement élevée à l'érosion, le développement de coulées est de moindre importance et devient, de ce fait, acceptable. Néanmoins, toute coulée majeure affectera la stabilité du barrage et exigera des mesures correctives.

#### 4.6.4.5 Pipelines

Regular inspections of the tailings pipelines are essential to prevent pollution from breakages and allow timely replacements to be made.

In order to reduce maintenance costs, higher capital costs may prove advantageous: a change to rubber or polyurethane lined steel pipes or a change to a plastic pipe.

#### 4.6.4.6 Valves

Tailings disposal is controlled by valves, which tend to be the bane of the operator's life. Once the most suitable valve is found, regular inspections and maintenance is essential to ensure control.

### 4.7 Remedial Measures

#### 4.7.1 General Problems

Certain major problems can arise on a tailings dam which require specific remedial measures as distinct from routine maintenance. The most serious may be grouped together as follows:

##### a) Overtopping

Straightforward overtopping occurs where the pond level rises above the wall level and water flows over the crest of the wall. This should never occur if proper operational procedures have been maintained to ensure adequate freeboard, even for abnormal rainfall, and an effective penstock or decant system to remove excess water is in use. However, if this should have occurred, the material will normally be eroded to form a gully the size of which will depend on the degree of overtopping and the erodibility of the material.

##### b) Surface Erosion

The outer face of a tailings dam presents a considerable catchment area for rainfall and the resultant run-off tends to erode gullies on the exposed faces of the walls. Gullies may also be eroded as a result of spillage of tailings over the top of the wall. Where the tailings material in the outer wall is relatively resistant to erosion the gulleying will be minor and is acceptable. Major gullies will, however, affect the overall stability of the dam and remedial action must be taken.

c) Érosion par percolation

Lorsque le drainage de pied est insuffisant, l'eau de percolation jaillit au pied du remblai, y créant une zone de faiblesse accompagnée très souvent d'érosion et conduisant à l'effondrement des remblais de périphérie. Ces deux facteurs réduisent la stabilité d'ensemble du remblai.

d) Boulance (Piping)

Un type particulier d'érosion due à la percolation est l'érosion par "piping"; le débit de percolation est concentré dans une voie préférentielle produisant de l'érosion interne et la formation d'un tuyau ou galerie, qui peuvent conduire à la destruction du remblai, si aucune mesure n'est prise. Le débit, agent de l'érosion par "piping", ne jaillit pas nécessairement au pied du remblai; bien au contraire, il peut jaillir n'importe où sur le talus d'un barrage.

e) Instabilité des talus

L'action combinée d'une résistance insuffisante, soit des stériles seuls, soit des stériles avec le sol de fondation, peut conduire à une rupture par cisaillement et à l'effondrement de la face extérieure du remblai. Des signes visibles de problèmes sérieux sont les fissures de tension sur les surfaces supérieures du remblai au voisinage des arêtes extérieures et un renflement de pied. En de tels cas, la probabilité d'une rupture est grande et des signes avertisseurs doivent être recherchés dans l'étude des données d'instrumentation et dans les analyses de stabilité utilisant les résistances réelles mesurées dans le barrage.

f) L'instabilité ou la non-étanchéité des tours de décantation ou des ouvrages à flanc de coteau.

L'instabilité des tours de décantation est attribuable aux faiblesses de leurs fondations et raccords aux collecteurs. Elle peut aussi être attribuée à une mauvaise obturation des ouvertures des évacuateurs de crues. Les stériles peuvent s'écouler vers les collecteurs par des fissures et des ouvertures mal fermées. De grands cratères peuvent se former mettant en danger le barrage tout entier. Ces défauts ne peuvent pas être réparés, puisque les parties affectées sont situées en-dessous de stériles saturés d'eau. Afin d'éviter de telles ruptures, les tours doivent être résistantes et érigées sur des fondations saines séparément du collecteur. Les ouvertures des évacuateurs doivent être bien fermées avec des joints d'étanchéité très soigneusement appliqués; il en est de même pour les ouvertures des évacuateurs de retenues à flanc de coteau.

c) Seepage Erosion

Where there is inadequate underdrainage, the seepage water exits at the toe of the wall creating a wet weak area, very often accompanied by erosion, leading to the undercutting of the outer walls. This serious condition, caused by allowing the phreatic surface to reach an unacceptably high level in the downstream part of the dam, must be remedied immediately to avoid progressive failure. Remedial measures are described in Section 4.7.3(c).

d) Piping

A particular form of seepage erosion is piping erosion; seepage flow is concentrated in a preferred channel leading to internal erosion and the formation of a pipe or tunnel which can lead to the breaching of the wall if not controlled. Piping does not necessarily exit at the toe, but may appear anywhere on the face of a dam. Remedial measures are described in Section 4.7.3(d).

e) Slope Instability

A combination of inadequate strength in the tailings and/or the foundation soil can lead to the threat of a slide failure or breakaway in the outer wall. Visual signs of serious problems are tension cracks on the upper surfaces of the wall near the outer edges and toe heave. In these cases the probability of a failure is very great and earlier warnings of problems should be obtained from the study of instrumentation records and stability analyses using the actual strengths measured in the dam.

f) Instability or Untightness of the Decant Towers or Side Hill Riser Decants. The instability of the decant towers is due to weaknesses in their foundations and connections to the collectors. It may also be due to the unreliable closing of the spillway openings. Tailings may flow through cracks and untightly closed openings into the collector. Large craters may form, endangering the security of the whole dam. These defects cannot be repaired, since the affected components lie under water-saturated tailings. In order to avoid such failures, the towers must be strong and reliable, erected on sound foundations separately from the collector. The spillway openings should be closed and very carefully sealed. The spillway openings of the side hill riser decants should also be very carefully closed.

#### g) Instabilité et non-étanchéité des collecteurs

Des ruptures sont susceptibles de se produire si les collecteurs ne sont pas bien conçus et fabriqués. La pulpe des stériles s'infiltré par des fissures; ces dernières s'élargissent graduellement, une grande quantité de stériles est entraînée et de vastes cratères se forment dans la retenue. Si un cratère se forme, l'entraînement des stériles vers et à travers le collecteur peut être stoppé par le déversement de grandes quantités de gravier et paille dans le cratère. Si le collecteur affecté est visible dans ce cratère, des sacs de ciment mélangés avec du sable doivent y être déversés, suivis de nouveau de gravier, sable et stériles, de manière à ce que le trou soit bien obturé et l'étanchéité rétablie.

Les collecteurs et les tours de décantation sont calculés souvent pour une profondeur de retenue initiale. Par la suite, il peut être décidé que cette profondeur doit être augmentée. Dans ce cas, les collecteurs et les tours deviennent surchargés. C'est pourquoi ces ouvrages doivent être conçus en vue de l'étape définitive.

Les ruptures de collecteurs peuvent aussi être attribuées à la détérioration du béton causée par les agents et réactifs chimiques de la pulpe, laissés dans les stériles pendant le procédé de traitement du minerai à l'usine. Si la pulpe contient des substances chimiques pouvant attaquer le béton, les collecteurs et les tours doivent avoir la résistance appropriée ou être protégés d'une autre façon. Ces mêmes exigences s'appliquent à l'acier au cas où des conduites à parois minces seraient utilisées dans la construction.

#### 4.7.2 Évaluation de la sécurité des barrages de stériles

Il est souvent nécessaire d'évaluer la sécurité d'un barrage de stériles. Ceci peut se produire, soit parce que le barrage n'a été ni bien conçu à l'origine ni bien construit, soit parce qu'il s'est présenté un problème lié aux méthodes d'exploitation. Un changement apporté à l'utilisation du dépôt ou aux caractéristiques du résidu exigera une étude tout autant qu'un changement dans la méthode de gestion ou de construction du barrage. En réalité, de telles études devraient être faites régulièrement, soit une fois par an, pour s'assurer que toute naissance ou amorce de problème ne sera passée inaperçue durant l'exploitation quotidienne du barrage.

##### 4.7.2.1 Inspection

Dans le cas d'une telle étude, la première étape sera d'exécuter une inspection détaillée du barrage en conformité avec les directives établies dans la section 4.6.1. Si on le juge approprié, on se référera à des graphiques de stabilité pour obtenir une indication préliminaire de la stabilité des talus en fonction de la hauteur, de la pente, du rythme de montée, ainsi que des caractéristiques de consolidation et de résistance des stériles. Si cette première étude de stabilité n'est pas rassurante, on aura recours à d'autres mesures pour vérifier la stabilité.



#### g) Instability and Leakage Defects of the Collectors

Failures may occur if the collectors are not properly designed and manufactured. Tailings pulp begins to seep through cracks; these cracks enlarge gradually, a large amount of tailings are washed out and big craters may form in the impoundment. If a crater is formed, the washing of tailings through the collector may be stopped by dumping large amounts of gravel and straw into the crater. If the ruptured collector is visible in the crater, cement bags mixed with sand should be dumped into it and again followed by gravel, sand and tailings, so that the hole is properly filled in and the water-tightness restored.

Collectors and decant towers are often calculated for a certain initial impoundment depth. Later on it may be decided that the impoundment depth should be greater. In this case the collectors and the towers become overloaded. That is why they should be designed for the final stage.

Failures in collectors can also be attributed to leaching of the concrete, due to pulp chemical agents and reagents left in the tailings during the ore dressing process at the factory. If the pulp contains chemicals which attack the concrete, the collectors and towers must be chemically resistant or should be otherwise protected. The same applies to steel, where thin walled steel tubes are used in the construction.

#### 4.7.2 Appraisal of the Safety of Existing Tailings Dams

It is often necessary to carry out an appraisal of the safety of an existing tailings dam. This may arise either because the dam was not originally adequately designed and constructed or because a problem has arisen from operational procedures. A change in the usage of the deposit or the characteristic of the residue would also require reappraisal as would a contemplated change in the method of management or of construction of the dam. In fact such appraisals should be carried out at regular intervals, say once a year, to make absolutely certain that no incipient problems have been overlooked in the day-to-day operation of the dam.

##### 4.7.2.1 Inspection

In the case of such reappraisal, the first step should be to carry out a careful inspection of the dam in accordance with the guidelines set out in Section 4.6.1. If appropriate, reference to stability charts may be made to obtain a preliminary estimate of the stability of the slopes from the knowledge of their height, angle, rate of rise and the consolidation and strength characteristics of the tailings. If this preliminary stability survey does not prove reassuring, further measures to investigate the stability should be taken.

#### 4.7.2.2 Mesures

Les premières mesures essentielles sont la localisation de la surface de percolation dans le barrage et l'évaluation de la résistance au cisaillement des stériles. L'établissement des profils de résistance au cisaillement in-situ du barrage peut être combiné avec l'installation des piézomètres. On procède en premier lieu à l'établissement des profils de résistance à des endroits choisis en utilisant un scissomètre (vane shear apparatus), un pénétromètre à cone piézométrique du type à tuyaux verticaux pouvant être installé dans les forages réservés aux mesures de la résistance au cisaillement. Les profils de résistance devront être établis sur toute la hauteur du dépôt de stériles et sur une profondeur aussi grande que possible de la fondation. Les profils de résistance dans la fondation au pied du talus doivent aussi être mesurés et des piézomètres installés.

#### 4.7.2.3 Analyse

Une fois les résultats des mesures disponibles, une analyse complète de la stabilité du barrage dans son état actuel peut être faite et par la même occasion, celle du barrage ayant subi des changements relatifs à son usage futur, ses exhaussements, etc., étudiés ou appliqués en cours d'exploitation. Afin de réaliser ces extensions et changements et pour obvier à certains problèmes de sécurité, il peut être nécessaire d'établir des mesures de précaution ou d'amélioration.

#### 4.7.3 Mesures de précaution ou d'amélioration

Dès qu'un problème est identifié, sa cause doit être déterminée. Chaque fois que cela sera possible les méthodes d'exploitation doivent être modifiées pour éliminer la cause du problème. Dans la plupart des cas des mesures additionnelles de précaution ou d'amélioration seront néanmoins requises, quelques-unes d'entre elles sont décrites ci-après:

##### a) Érosion en coulée

La protection contre l'érosion superficielle par végétalisation des talus ou par d'autres types de précaution est du domaine des spécialistes et de ce fait n'est pas traitée ici. Lorsque des coulées se sont formées et menacent de devenir sérieuses, on peut les recouvrir au moyen de sections pré-engazonnées (grass sods) dont les racines fibreuses retiendront le sol et empêcheront l'érosion de se poursuivre.

##### b) Détérioration du remblai

Une détérioration du remblai extérieur, causée par une coulée majeure ou une rupture de talus dues à l'érosion, exige une action aussi bien immédiate qu'à long terme. L'action immédiate, si la partie en question du barrage doit rester en service, consiste à reculer le talus du remblai à une distance de sécurité en-deça du point de rupture. Ceci comporte deux désavantages: le remblai extérieur dans ce tronçon repose sur un matériau faible non consolidé et une partie considérable de la surface de dépôt est perdue.

#### 4.7.2.2 Measurements

The first essentials are to locate the seepage surface in the dam and to assess the shear strength of the tailings. Measurement of in-situ shear strength profiles for the dam may be combined with the operation of installing piezometers. Strength profiles are first measured at strategic points using a vane shear apparatus, a piezometer cone penetrometer or a pressiometer, after which stand-pipe piezometers may be installed in the shear strength holes. The strength profiles should extend through the full height of the tailings deposit and as far as possible into the foundation stratum. Strength profiles should also be measured and piezometers installed in the foundation stratum at the toe of the slope.

#### 4.7.2.3 Analysis

Once the results of these measurements have become available a full stability analysis of the dam in its present condition can be performed and the effect of changes in future use of the dam, such as extensions of its height, investigated and accommodated. In order to effect such extensions and changes and overcome certain problems with safety it may be necessary to undertake precautionary and remedial measures.

#### 4.7.3 Precautionary and Remedial Measures

Once a problem has been identified, its cause must be determined. Wherever possible operational procedures must be modified to eliminate the cause of the problem. In most cases, however, additional precautionary and remedial measures will be required, some of which are outlined in this section.

##### a) Gully Erosion

The protection against surface erosion by vegetating slopes or other protective treatment is a subject on its own and is not treated here. Where gullies have formed and threaten to become serious, they can be filled with grass sods where the fibrous root system will hold the soil together and prevent further erosion.

##### b) Breaks in Wall

A breach in the outer wall caused by a major erosion gully or a slope failure or breakaway requires both immediate and long-term action. The immediate action, if that section of the dam is to continue to operate, is to step back the outer face of the wall to a safe distance behind the head of the break. This has two disadvantages in that the outer wall in this weak sector is carried on weak unconsolidated material and that a considerable deposition area is lost.

L'objectif à long terme est de récupérer et rétablir l'aire affectée. La section en cause doit être dégagée jusqu'à ce qu'une bonne fondation au pied du remblai soit atteinte. Par la suite un remblai avec drainage de pied doit être réalisé dans la zone de rupture pour permettre le remplissage aussi rapide que la sécurité le permet, pour rétablir l'aire et rattraper le sommet du remblai (cf figure 4-25)

c) Problèmes de percolation

La réponse évidente aux problèmes de percolation au pied du remblai consiste à améliorer le drainage de pied, ce qui peut se faire de plusieurs façons:

- i) Enfoncer des tuyaux de drainage perforés dans le remblai existant, tel que montré dans la Fig. 4-26.
- ii) Construire un massif d'appui de stériles avec drainage de base au droit de la zone affectée. En réalité ceci signifie l'addition au remblai d'un nouveau pied drainant. Normalement un tel massif d'appui aura une largeur de 15 à 20 m pour inclure un drain de pied approprié, et sa pente extérieure sera la même que celle du remblai existant ou moins, tel qu'illustré dans la Fig. 4-27.

Selon la hauteur du remblai existant et le niveau dans le bassin, il y aura une hauteur minimale de massif d'appui, faute de quoi la percolation se reproduira à nouveau par-dessus le massif.

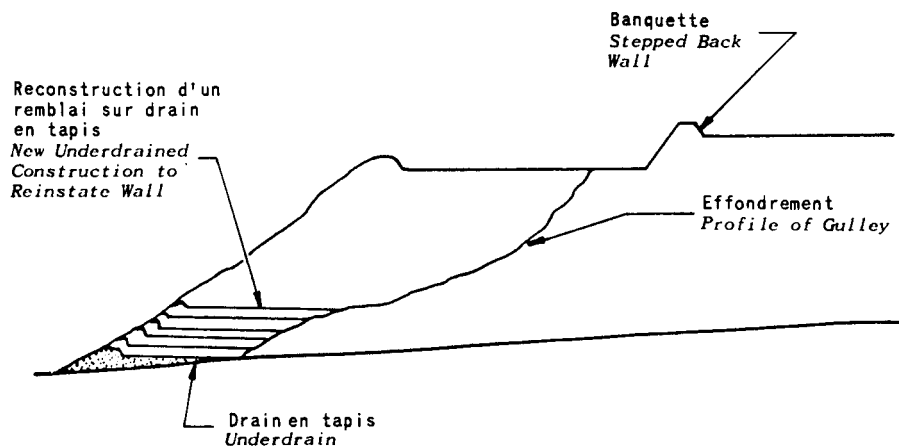


FIG. 4-25

Mesures correctrices : Réaménagement d'une zone d'effondrement  
 Remedial measures : Reinstatement of major gully or slide area

The longer term objective is to recover and reinstate the affected area. The sector should be cleared out to a good foundation at the toe of the wall and an underdrained wall should be constructed in the break to allow the area to be filled as rapidly as safety permits to reinstate the area and catch up with the top of the wall. This is illustrated in Fig. 4-25.

c) Seepage Problems

The obvious answer to seepage problems at the toe is to improve the underdrainage and this may be done in several ways:

- (i) Pushing or jetting perforated pipe drains into the existing wall, as shown in Fig. 4-26.
- (ii) Constructing an underdrained tailings buttress against the affected area. This in effect means adding a new underdrained toe to the wall. Normally such a buttress will be 15 to 20 m wide to provide an adequate underdrain, and its outer slope shall be the same as the slope of the existing wall or less, as illustrated in Fig. 4-27.

Depending on the height of the existing wall and the level of the pond, there will be a minimum height of buttress; otherwise the seepage may reappear above the buttress.

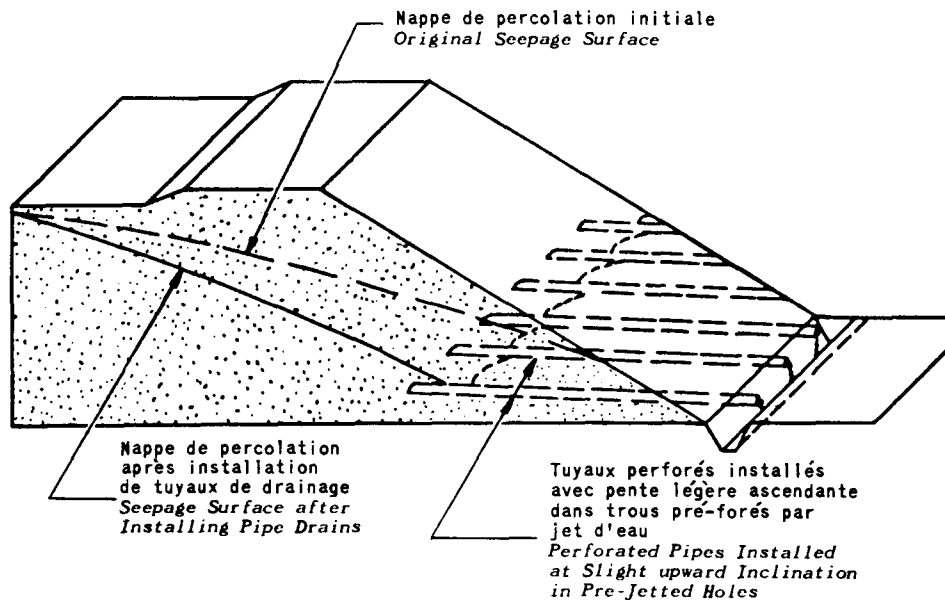


FIG. 4-26

Mesures correctrices : Drains perforés  
*Remedial measures : Perforated pipe drains*

iii) Placer un massif d'appui rocheux disposé en filtre au droit de la zone affectée. Le but de ce traitement est de permettre aux eaux de percolation de s'écouler du talus de stériles sans éroder le matériau. Les couches filtrantes sont placées contre les stériles pour empêcher leur érosion et les enrochements drainants sont déversés de façon à former un massif d'appui qui retiendra le filtre en position. Le massif doit avoir une largeur d'environ 4 m permettant le passage des camions livrant les enrochements. Il doit avoir un talus extérieur égal ou inférieur à la pente des stériles en place. Le massif doit être construit à une cote légèrement supérieure à la cote prévue du point d'émergence des débits de percolation, tel que montré dans la Fig. 4-28. Un problème pouvant se présenter dans le cas des massifs d'appui rocheux est leur colmatage par les éléments fins charriés par le ruissellement depuis la surface des stériles situés au-dessus.

d) Boulance (Piping)

Les ruptures par boulance (piping) ont lieu souvent très rapidement dès que se forme le premier chemin privilégié. Pour cette raison tout signe de "piping" exige une intervention immédiate. La première étape sera par conséquent d'abaisser le niveau du bassin, particulièrement dans les zones soupçonnées de "piping" aussi rapidement que possible. Si la localisation du point d'entrée d'un chemin préférentiel dans le corps du barrage est possible, ce point peut être recouvert, compacté et scellé. Cependant ceci ne sera possible que rarement, le point d'entrée étant en général submergé. De plus, comme ce type d'érosion est amorcé à partir de l'extérieur et se poursuit vers l'intérieur, il n'est décelé à l'intérieur que lorsqu'il s'est déjà bien développé.

Des stériles pourvus de drainage de pied ainsi que des massifs d'enrochements filtrants préviendront les ruptures d'érosion par "piping" au pied d'un remblai de stériles. Si l'on observe des tâches humides ou un filet d'eau indiquant un processus d'érosion en cours à un niveau plus élevé, la zone affectée doit immédiatement être couverte d'un filtre et lestée avec des

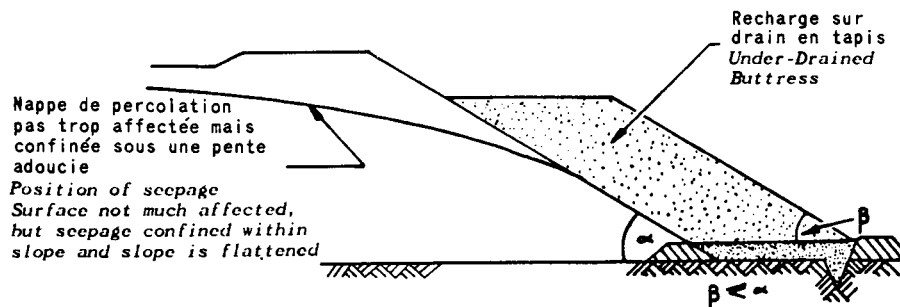


FIG. 4-27

Mesures correctrices: Addition d'une recharge de stériles sur drain en tapis  
Remedial measures: Addition of under-drained tailings buttress

(iii) Placing a filtered rock buttress against the affected area. The aim of this treatment is to allow the seepage water to exit from the tailings face without eroding tailings material. The filter layers are placed against the tailings face to prevent erosion of the tailings and the free-draining rock is dumped to form a buttress to hold the filter in place. The buttress should have a width of about 4 m to permit trucks to travel on it to dump the rock, and it should have an outer slope equal to or less than the existing tailings slope. It should extend to slightly above the height of the anticipated seepage exit zone as shown in Fig. 4-28. A problem that arises with rock buttress is blinding by fines carried down by run-off from the tailings surface above.

d) Piping

Piping failures often develop very rapidly once the first narrow pipe has been formed and therefore any sign of piping requires immediate action. The first step will therefore be to lower the pond level, especially in areas near the suspected piping, as rapidly as possible. If it is possible to locate the inlet to a suspected pipe on the inside of the dam, the area can be compacted and sealed. However, it will rarely be possible to do this as the inlet will most often be under water and as piping occurs from the outside and erodes its way inwards, it will only show on the inside when well developed. Underdrained tailings and filtered rockfill buttresses will prevent piping failures at the toe of a tailings wall. If damp patches or a fine trickle of water indicates a piping condition at a higher level, the affected area should immediately be covered by a filter and ballasted with waste rock to prevent erosion of material and enlargements of the pipe while still letting the water flow out. This may be very difficult on a steep outer face and will probably require the construction of a rock buttress up to that level.

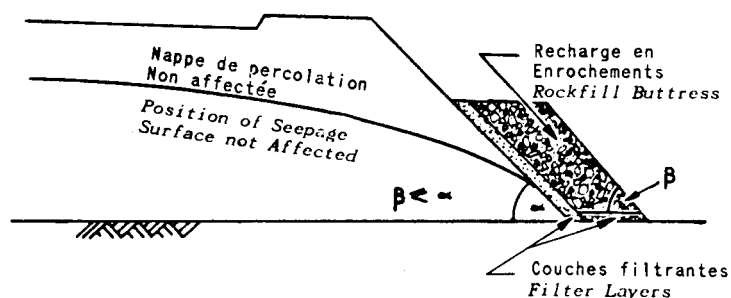


FIG. 4-28

Mesures correctrices : Addition d'une recharge enrochement - filtre  
 Remedial measures : Addition of filtered rock buttress.

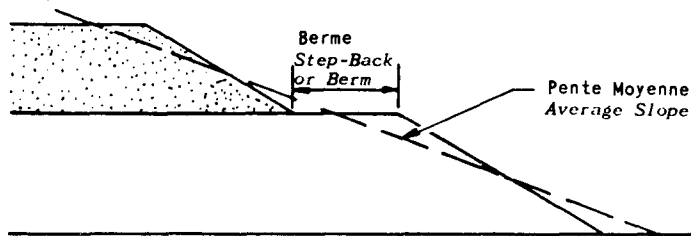


FIG. 4-29

Mesures correctrices : Réduction de pente par berme ou retrait  
*Remedial measures : Flattening slope by forming a berm or stepping back*

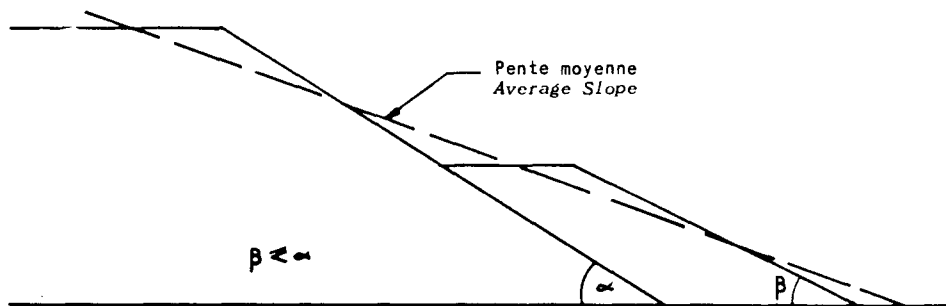


FIG. 4-30

Mesures correctrices : Réduction de pente au moyen d'une recharge  
*Remedial measures : Flattening slope by adding a toe weight*

enrochements de rejet pour empêcher l'érosion du matériau et l'agrandissement du chemin préférentiel tout en permettant à l'eau de s'écouler. Ceci peut s'avérer très difficile sur un talus extérieur raide et exigera probablement la construction jusqu'à cette cote d'un massif d'enrochements.

#### e) Instabilité des talus

L'instabilité des talus dépend de la hauteur du barrage, de l'angle (ou pente du talus) extérieur et de la position de la nappe phréatique. On ne peut faire que très peu en ce qui a trait aux caractéristiques de résistance d'un remblai existant et toutes les mesures correctives se concentreront sur le rapport entre la hauteur et la pente compte tenu du fait que l'instabilité est causée par une pente extérieure trop raide pour la hauteur du barrage.

Dans un cas où un remblai existant est considéré sûr avec sa hauteur et sa pente actuelles, mais que le fait de l'exhausser en conservant sa pente le rend non sûr, la solution est de réduire la pente moyenne à l'aide d'une risberme, comme indiqué sur la Fig. 4-29.



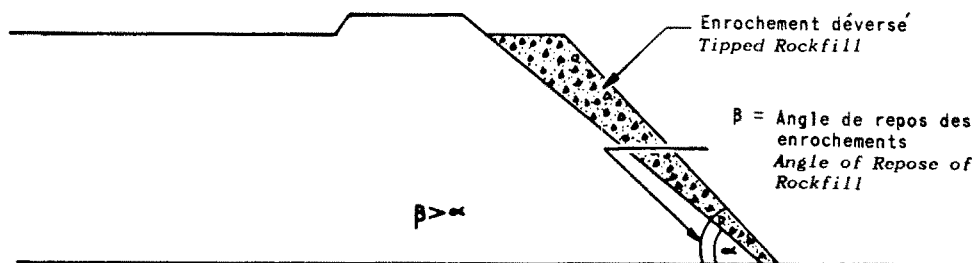


FIG. 4-31

Mesures correctrices : Mauvaise construction d'une recharge en enrochement  
 Remedial measures : Incorrect construction of rockfill buttress

#### e) Slope Instability

Slope instability depends on the height of the dam, the outer slope angle, the strength characteristics of the material and the position of the phreatic surface. Little can be done about the strength characteristics in an existing wall and remedial measures are therefore concentrated on the relationship between height and slope with the concept that instability is caused by the outer slope being too steep for the height of the dam.

Where an existing wall is considered safe at its present height and slope but raising it to some further height, if that same slope is maintained, will make it unsafe, the remedy is to reduce the overall slope by stepping back. Fig. 4-29 illustrates this.

Dans le cas où un remblai existant est estimé non sûr en raison de sa constitution, la pente doit être réduite, ce qui se fait le plus facilement en montant un massif d'appui de stériles ou d'enrochements, comme il est indiqué sur la Fig. 4-30. La hauteur exacte à laquelle le massif doit s'élever pour en retirer le maximum d'avantage dépend de la géométrie du remblai et de la surface de rupture. Il est évident que si le massif est construit avec toute la hauteur du remblai, aucun ou très peu d'avantage ne sera obtenu de la réduction de la pente. En général, on considère qu'un massif ayant une hauteur variant entre 0,3 et 0,5 fois la hauteur du remblai de stériles donnera un avantage maximum.

NOTE: L'angle de repos (frottement interne) des enrochements est toujours plus grand que l'angle du talus extérieur des remblais de stériles. Si les enrochements sont déversés depuis le haut par déchargement latéral ou en bout de remblai, sans que le talus extérieur ne soit ajusté à celui du remblai de stériles, un massif déversé, en forme de bouchon, pourra être réalisé, réduisant ainsi la stabilité du remblai plutôt que l'augmentant, comme l'illustre la Fig. 4-31.

Where an existing wall is found to be inherently unsafe, the slope of the wall must be reduced and this can best be done by the addition of a tailings or rock buttress as illustrated in Fig. 4-30. The exact height to which the buttress must be raised to gain maximum benefit depends on the geometry of the wall and the failure surface. It should be obvious that if the buttress is raised to the full height of the wall, no, or very little, benefit of flattening the slope has been gained. In general it can be said that a buttress between 0,3 and 0,5 times the height of the tailings wall will give maximum benefit.

NOTE: The angle of repose of rockfill is invariably considerably steeper than the outer slope of tailings walls. If rockfill is dumped from the top by side or end tipping without trimming the outer face down to the slope of the tailings wall, an inverted wedge-shaped buttress can be formed which will reduce the stability of the wall instead of increasing it, as illustrated in Fig. 4-31.

## BIBLIOGRAPHIE

1. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, proceedings of the conference on geotechnical practice for the disposal of solid waste materials. 13-15 June, 1979.
  2. ANDRÉ, K.V. et al., control of pollution from tailings dams containing a high proportion of coarse material.  
From: Commission Internationale des grands barrages. 12th Congress, Mexico 1976.
  3. CALDWELL, Jack, bafokeng findings: guidelines requested for slimes dam construction, maintenance.  
From: S.A. Mining and Engineering Journal, October 1978.
  4. CANADA, DEPARTMENT OF ENERGY, MINES AND RESOURCES, tentative design guide for mine waste embankments.  
From: Technical Bulletin TB 145, 1972.
  5. CHAMBER OF MINES OF SOUTH AFRICA, code of practice for construction of slimes dams and the condition in which they should be left at the time of mine closure.
  6. COUNCIL FOR SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH - Donaldson, G.W., the design and construction of special type hydraulic fill dams.
  7. DONALDSON, G.W., the design and construction of special type hydraulic fill dams.  
From: The Transactions of the S.A. Institution of Civil Engineers. Vol. 5, Nos. 9 and 12, 1955.
  8. DONALDSON, G.W., slimes dams for gold mine tailings and other residues in South Africa.  
From: Commission Internationale des grandes barrages, 12th Congress, Mexico 1976.
  9. DONALDSON, G.W., a summary of slimes dams practice in the United States of America and Canada.
  10. Klohn, Earle J., design and construction of tailings dams.  
From: The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin for April, 1972.
-

11. MROST, M., slimes disposal at South African gold mines.  
From: Journal of the S.A. Institute of Mining & Metallurgy,  
February, 1974.
12. PIESOLD, D.D.A. - some aspects in the design of the new dam  
constructed for Mufulira Copper Mines Ltd.  
From: Northern Rhodesian Society of Engineers' Journal, May 1963.
13. TAILINGS DISPOSAL TO-DAY, Vols. 1 & 2 (Proceedings of  
International Conferences) 1972 + 1978.

## 5. CLOTURE ET ABANDON

### 5.1 Généralités

La clôture ou abandon d'une retenue de stériles peut se produire en de nombreuses circonstances. Parmi celles-ci, notons l'exigence d'une hauteur économique ou de régularisation, la rupture partielle du réservoir et la fermeture de la mine ou des ouvrages qu'elle servait. Un drainage continu et une certaine consolidation peuvent améliorer la stabilité des stériles mis en dépôt mais des dispositions sont nécessaires pour éviter des risques futurs. Voici les principaux dangers contre lesquels il faut se prémunir:

1. Les dommages résultant d'ouragans, crues, averses, pouvant affecter considérablement la stabilité et causer l'érosion des talus avec épandage des stériles sur les terres voisines;
2. La pollution des eaux par des matériaux en solution ou des stériles en suspension dans l'eau de drainage;
3. Des affaissements locaux ou des chocs séismiques pouvant conduire à l'instabilité;
4. Pollution de l'air due à l'érosion éolienne.

Les retenues de stériles sont souvent construites comme des réservoirs conventionnels en travers d'une vallée. Plusieurs peuvent être construits dans une vallée, présentant ainsi un danger de rupture en cascade dont un exemple frappant fût le désastre de Buffalo Creek en 1972. Après l'abandon, des précautions doivent être prises pour passer à l'aval en toute sécurité la crue maximale possible pouvant avoir lieu dans la vallée.

L'aspect sérieux de la pollution de l'eau peut dépendre du type de stériles dans les retenues désaffectées. Si ces retenues sont contaminées il sera nécessaire d'isoler le drainage; en cas contraire, il suffira de veiller à ce que les eaux de ruissellement s'écoulent sans produire d'érosion.

Les déformations par cisaillement ou les chocs induits par des affaissements locaux ou des tremblements de terre peuvent produire de très hautes pressions interstitielles dans les stériles et pourraient de ce fait conduire à des ruptures du type de celles qui ont eu lieu au Chili en 1965. Un tel risque doit être évalué, de même que les conséquences de telles ruptures et de l'épandage possible de boues sur de grandes distances.

## 5. CLOSURE AND ABANDONMENT

### 5.1 General

The closure or abandonment of a tailings lagoon may occur because of a variety of circumstances. These include reaching an economic or regulation height, partial failure of the lagoon and closure of the mine or works that it served. Continued drainage and consolidation can improve the stability of the discarded tailings, but provision must be made to avoid future danger to mankind. Hazards that must be guarded against include:

1. Stormwater damage. This can adversely affect stability and cause slope erosion with consequent spread of tailings on to adjoining land.
2. Water pollution by dissolved materials or tailings themselves carried by drained water.
3. Mining subsidence or earthquake shocks that could cause instability.
4. Air pollution due to wind erosion.

Tailings lagoons are often built like impounding reservoirs in a valley. Several may be constructed in one valley, presenting a cascade hazard exemplified by the Buffalo Creek disaster of 1972. After abandonment, arrangements must be made to safely conduct the maximum possible flood that can occur in the valley past the old lagoons.

The seriousness of water pollution may depend on the type of tailings in the old lagoons. If they contain poison it will be necessary to isolate drainage: if not, it may only be necessary to arrange for rainfall run-off to occur without causing erosion.

Shear strains or shock loading induced by subsidence or earthquakes can produce very high pore pressures in tailings and could lead to failures of the type experienced in Chile in 1965. The risk of this must be assessed, together with the consequences of failure and possible mud flows over great distances.

Si l'on peut escompter la croissance d'une végétation appropriée sur la superficie des barrages désaffectés et des retenues remplies, l'érosion éolienne pourra être éliminée. Si la végétation n'y croît pas, l'érosion éolienne pourra être néanmoins limitée en procédant à la mise en place d'une couche de matériaux granulaires grossiers par-dessus les rejets fins.

Les différents aspects des couvertures végétales et autres types de protection utilisables dans le cas d'abandon de barrages et retenues de stériles et de remise en état du terrain ont été traités dans un certain nombre de communications lors du premier et du second congrès international sur les stériles tenus respectivement à Tucson ( Arizona ) en 1972 et à Denver ( Colorado ) en 1978.

## 5.2 Règlementation

Certains pays ont passé des lois et règlements portant sur le choix des sites, la conception, la construction et l'abandon des remblais de stériles. Ceux qui portent sur l'abandon des remblais de stériles varient d'un pays à l'autre. L'exemple ci-dessous donne un aperçu de la réglementation que l'on retrouve généralement :

### 5.2.1 Règlements en Grande Bretagne

En Grande Bretagne les dépôts de résidus miniers et industriels sont contrôlés par les lois et règlements suivants:

- a) Mines and Quarries Act, 1954
- b) Mines and Quarries (Tips) Act, 1969
- c) Mines and Quarries (Tips) Regulations, 1971
- d) Mines/Quarries (Notification of Dangerous Occurrences) Orders, 1959
- e) Town and Country Planning Acts, 1962 to 1968
- f) Rivers (Prevention of Pollution) Acts, 1951 to 1961
- g) Clean Air Acts, 1956 to 1968

Dans cette réglementation, l'expression "tip" (dépôt) désigne une accumulation ou dépôt de rejets d'une mine ou carrière (à l'état solide ou en solution ou suspension), autre qu'une accumulation ou dépôt en souterrain. Lorsqu'une barrière ou tout autre ouvrage retient ou délimite un remblai, que cette barrière ou ouvrage soit constitué ou non de rejets, elle sera considérée comme faisant partie du dépôt, aux fins de la réglementation.

Les règlements s'appliquent à toute retenue de stériles située à plus de 4 m au-dessus des terres avoisinantes ou ayant un volume supérieur à 10 000 m<sup>3</sup>.

Une distinction est à faire entre les dépôts (tips) ayant été remplis, ou désaffectés depuis longtemps pour d'autres raisons, tout en demeurant partie d'une mine en exploitation et un dépôt faisant partie d'une mine fermée. Dans le premier cas, le dépôt est appelé un "closed tip" ou dépôt clôturé (ou fermé) et se trouve sous la responsabilité du propriétaire de la mine. Dans le deuxième cas, le dépôt est désigné par l'expression "disused tip", (dépôt désaffecté) et se trouve sous la juridiction de l'autorité locale (i.e. le conseil de comité ou de commune, etc.).



If vegetation can be induced to grow over the surface of abandoned dams and lagoons wind erosion may be eliminated. If vegetation will not grow, wind erosion can be reduced by placing a coating of coarse material over the fine discard.

Vegetation aspects and other types of protective cover for the abandonment of tailings dams and impoundments and land rehabilitation were the subject of some papers at the First and Second International Tailing Symposia in Tucson, Arizona in 1972 and in Denver, Colorado, in 1978.

## 5.2 Regulations

Some countries have enacted laws and regulations to govern the site selection, design, construction and abandonment of waste embankments. Regulations relating to closure of waste embankments vary from country to country. The following example is typical of such regulations:

### 5.2.1 Regulations in Great Britain

In Great Britain waste tips or embankments are controlled by:

- a) the Mines and Quarries Act, 1954
- b) the Mines and Quarries (Tips) Act, 1969
- c) the Mines and Quarries (Tips) Regulations, 1971
- d) the Mines/Quarries (Notification of Dangerous Occurrences) Orders, 1959
- e) the Town and Country Planning Acts 1962 to 1968
- f) the Rivers (Prevention of Pollution) Acts, 1951 to 1961
- g) the Clean Air Acts, 1956 to 1968.

In these regulations, "tip" means an accumulation or deposit of refuse from a mine or quarry (whether in a solid state or in solution or suspension) other than an accumulation or deposit situated underground, and where any wall or other structure retains or confines a tip then, whether or not that wall or structure is itself composed of refuse, it shall be deemed to form part of the tip for the purposes of the regulations.

The regulations apply to any tailings lagoon that is more than 4 m above adjoining land or has a volume greater than 10,000 m<sup>3</sup>.

A demarcation is made between a tip that has become full or for some other reason is no longer used, but is associated with a working mine and a tip attached to a closed mine. The first is called a "closed" tip and is the responsibility of the mine owner. The second is a "disused" tip and it is put under the jurisdiction of the local authority (i.e. county or borough council).

#### Dépôt fermé

Lorsqu'un dépôt est fermé, le propriétaire de la mine ou de la carrière doit en avertir l'inspecteur des mines du district dans un délai de deux mois. La personne responsable doit préparer et signer un rapport exact et complet d'inspection. Ces rapports d'inspection doivent être conservés au bureau de la mine ou carrière pendant au moins 3 ans et de plus, la personne responsable doit consigner dans un journal séparé tout défaut relevé au cours de son inspection. La personne ayant la charge du dépôt doit consigner l'action entreprise pour corriger chaque défaut. Dans le cas d'une retenue de stériles fermée, ces enregistrements doivent être conservés pendant au moins 5 ans.

Le propriétaire d'une mine veillera à obtenir de la personne responsable, des rapports sur la sécurité de toute retenue fermée, au moins tous les cinq ans ou aussitôt que possible après tout événement dangereux. De tels rapports doivent donner une opinion sur la sécurité du dépôt, des détails sur tout affaissement ou déformations de surface, des rapports de relevés topographiques, de forages, d'essais, etc., ainsi que la nature de toutes mesures d'inspection, de surveillance et de sécurité nécessaires pour assurer la sécurité du dépôt. De tels rapports doivent être conservés, conjointement avec les dessins et autres documents au bureau de la mine à l'usage des inspecteurs ou autres personnes autorisées.

#### Dépôt désaffecté

Afin d'assurer la stabilité d'un dépôt désaffecté et de l'empêcher de devenir un danger pour le public, les autorités locales se sont vues confier des pouvoirs pour:

- a) exiger du propriétaire d'un dépôt les documents concernant le dépôt et le terrain sous-jacent;
- b) obtenir l'accès au dépôt et terrains avoisinants aux fins d'inspection, exploration, etc.;
- c) exiger du propriétaire tous travaux de réparation nécessaires;
- d) mener à bien elles-mêmes tout travail de réparation estimé essentiel;
- e) recouvrer le coût des travaux de réparation de:
  - i) le ou les propriétaires du dépôt au cours des dernières 12 années;
  - ii) toute autre personne ayant utilisé le dépôt durant cette période;
  - iii) toute autre personne ayant causé ou contribué à l'instabilité du dépôt, pendant les dernières 12 années;
- f) obtenir un crédit du Trésor pour payer une partie ou la totalité des travaux de réparation.

Closed Tip:

When a tip is closed, the mine or quarry owner must give notice of this to the mines inspector for the district, within two months. He must then have a closed tailings lagoon inspected by a competent person at intervals not exceeding six months. The competent person must make and sign a full and accurate report of the inspection. These inspection reports must be kept at the office of the mine or quarry for at least three years and in addition, the competent person must record every defect revealed by his inspection in a separate record book. The person responsible for the tip must record the action taken to remedy each defect. In the case of a closed tailings lagoon, these records must be kept for at least five years.

Reports on the security of a closed lagoon must be obtained by the mine owner from a competent person at least every five years or as soon as practicable after any dangerous occurrence. Such reports must give an opinion whether the tip is secure, details of any subsidence or surface movements, accounts of surveys, boreholes, and tests, and the nature of any inspection, supervision and safety measures necessary to ensure the security of the tip. These should be kept, together with records and drawings, at the mine office for use by the inspectors or other authorised persons.

Disused Tip:

To ensure the stability of a disused tip and prevent it from becoming a danger to members of the public, the local authority have been given powers to:

- a) require the owner of the tip to produce documents relating to the tip and the land it is on;
- b) obtain entry to the tip and adjoining land for purposes of inspection and exploration;
- c) require the owner to carry out remedial work;
- d) carry out essential remedial work themselves;
- e) recover the cost of the remedial work from:
  - i) the owner or owners of the tip during the past 12 years;
  - ii) any other person who has used the tip during that period;
  - iii) any other person who has caused or contributed to the instability of the tip, during the past 12 years;
- f) seek a grant to pay for some or all of the remedial work.

D'après la Loi (Act), un dépôt désaffecté doit être considéré comme instable si, et seulement si une déformation du dépôt provoquant un accroissement important de son emprise se produit effectivement ou est raisonnablement très probable.

En Grande Bretagne il n'y a que très peu de retenues de stériles (de résidus) désaffectées. Plusieurs d'entre-elles sont situées à des niveaux inférieurs à celui du sol, dans d'anciennes carrières ou usines de céramique; elles contiennent des matériaux chimiquement inertes. Le seul danger qu'elles présentent concerne les travaux pouvant être exécutés sur leur emprise tels l'installation de conduits, câbles pouvant les traverser, etc.

La National Coal Board a établi des codes et règlements pour les dépôts, (Codes and Rules for Tips, 1971) ayant trait à des dépôts en activité ou fermés. Cette organisation veille à l'inspection de ses propres dépôts désaffectés de la même manière que de ses dépôts fermés. La Central Electricity Generating Board considère ses retenues de cendres comme des réservoirs sous l'empire de la loi des réservoirs Reservoirs (Safety Provisions) Act et en confie l'inspection à un groupe d'ingénieurs (Panel of Engineers) qui en fait une inspection détaillée à des intervalles de 10 ans au plus.

La nouvelle loi des réservoirs (New Reservoirs Act), laquelle n'est pas encore entrée en vigueur, exige une surveillance constante des réservoirs et peut conduire à une inspection plus fréquente des retenues de cendres.

#### 5.2.2 Règlements dans d'autres pays

##### Dépôts désaffectés dans d'autres pays

Le Canadian Center for Mineral and Energy Technology (Centre Canadien pour la technologie de l'énergie et des minerais), a publié un ouvrage intitulé Pit Slope Manual (1977). Le chapitre 9 de ce manuel traite des remblais de stériles, y compris les retenues, et recommande que les remblais soient, lors de leur désaffectation, (ré-insertion dans l'environnement), laissés dans un état tel que seul un entretien occasionnel sera nécessaire pour prévenir et empêcher une détérioration pouvant entraîner une instabilité. Ceci appelle une attention spéciale pour:

- a) mettre en application des méthodes de drainage fiables, capables d'un fonctionnement adéquat durant plusieurs années avec un minimum d'entretien;
- b) protéger les talus de remblais contre les effets d'érosion en surface et contre les intempéries.

En Afrique du Sud, les règlements adoptés en 1976 renforcent la réglementation existante ayant trait à la pollution de l'eau et exigent que les directeurs de mines mesurent et analysent les débits d'effluents quatre fois par année. Selon la loi Water Act 1956, le directeur d'une mine doit veiller à ce que le ruissellement de la pluie n'érode pas les barrages de boues et les retenues de stériles. Les eaux d'averses doivent être contrôlées de manière

For the purposes of the Act, a disused tip shall be treated as unstable if, and only if, there is, or there is reasonable ground for believing that there is likely to be, such a movement of the refuse which makes up the tip as to cause a significant increase in the area of land covered by the tip.

Britain contains very few disused tailings lagoons. Many of those are below general ground level, in old quarries or clay workings and are of chemically inert materials. The only hazards they present are to works that might be carried out over them such as pipes or cables that might be laid across them.

In the United Kingdom, the National Coal Board has produced Codes and Rules for Tips (1971) relating to active and closed tips. It normally inspects its own disused tips in the same way as its closed tips. The Central Electricity Generating Board consider their fly-ash lagoons as reservoirs under the 1930 Reservoirs (Safety Provisions) Act and have them designed and inspected by Panel Engineers. This involves detailed inspection at least every ten years.

The new Reservoirs Act that has not yet been implemented requires constant surveillance of reservoirs and may lead to more frequent inspection of the fly-ash lagoons.

#### 5.2.2 Regulations in Other Countries

##### Abandoned tips in other countries

The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology has published a Pit Slope Manual (1977). Chapter 9 of this manual deals with waste embankments, including tailings lagoons. It recommends that embankments should be put into such a condition before being abandoned that only occasional maintenance will be required to prevent deterioration to the point where instability can develop. This will usually require care to:

- a) provide reliable drainage schemes, capable of functioning adequately for many years with little maintenance, and
- b) protect embankment slopes against surface erosion and weathering.

In South Africa regulations made in 1976 reinforce existing regulations on water pollution and require mine managers to measure flow rates and analyse effluent four times a year. Under the Water Act 1956, the manager of a mine is required to make adequate provision to prevent rain run-off from eroding slimes dams and tailings lagoons. Stormwater must be controlled so that it flows clear of slimes dams, mineral, tailings and waste-rock dumps and

à ce que leur écoulement se fasse hors de l'emprise de barrages de boues, de dépôts de minerai, stériles ou rebuts, ainsi que de toutes autres causes de pollution.

Des barrages d'arrêt et des barrages d'évaporation doivent être prévus lorsque nécessaire pour empêcher les eaux de ruissellement de traverser des barrages de stériles pouvant comporter des matériaux érodables. Les capacités d'emmagasinement de ces barrages doivent suffire pour assurer une revanche d'au moins 0,5 m, au-dessus du niveau d'eau maximum prévu, basé sur une précipitation mensuelle moyenne, moins l'évaporation moyenne brute, plus la précipitation maximale prévue durant une période de 24 heures, une fois tous les 100 ans.

Le directeur d'une mine doit veiller à ce que les barrages de stériles ou de boues et les barrages d'arrêt ou d'évaporation soient tous localisés et conçus de façon à minimiser la possibilité de dommages par affaissements locaux, affaissement de remblais, choc et fissuration résultant des opérations minières. Les retenues de stériles désaffectées ainsi que les dépôts de résidus doivent être clôturés de manière appropriée et ne doivent servir à aucune autre fin sans approbation préalable. Toute personne déplaçant des matériaux sera tenue responsable des mesures de rétablissement des lieux de manière à éviter effectivement la pollution de l'eau.

other sources of pollution. Barrier dams and evaporation dams shall be provided where necessary to retain run-off from tailings dams that may include eroded material. The storage capacities of these dams shall be sufficient to ensure a freeboard of at least 0,5 m above the expected maximum water level, based on average monthly rainfall, less gross mean evaporation, plus the maximum precipitation expected over a 24 hour period once in a hundred years.

The mine manager shall ensure that as far as practicable, tailings or slimes dams, barrier or evaporation dams shall be located and designed to minimise the possibility of damage by subsidence, settlement, shock and cracking, due to any mining operations. Disused tailings lagoons and waste dumps shall be kept adequately fenced and shall not be used for any purpose without approval. Any person removing material shall be responsible for reinstatement to effectively avoid water pollution.

## BIBLIOGRAPHIE

1. BACH, Dan A., the use of drip irrigation for vegetating mine waste areas.  
From: Tailing Disposal To-day: Proceedings of the First International Tailing Symposium, Tucson, Arizona. October 31, November 1, 2 and 3, 1972. Chapter 23: pp. 563-570.
2. BEWNGSON, Stuart A., irrigation technique for tailing re-vegetation in the arid Southwest.  
From: Tailing Disposal To-day, Vol. 2: Proceedings of the Second International Tailing Symposium, Denver, Colorado, May 1978. Section 4 - Reclamation, Vegetation and Abandonment Chapter 24; pp. 487-504.
3. CHENIK, D. the promotion of a vegetative cover on mine slimes dams and sands dumps.  
From: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1960.
4. CLAUSEN, H.T., ecological aspects of slimes dam construction.  
From: The South African Institute of Mining and Metallurgy. General Meeting and Collogium on "The Construction of Slimes Dams", 1973.
5. DAY, A.D. and K.L. LUDEKE, disturbed pond reclamation in an arid environment.  
From: Tailing Disposal To-day, Vol 2: Proceedings of the Second International Tailing Symposium, Denver, Colorado, May 1978. Section 4, Reclamation, Vegetation and Abandonment Chapter 21 pp. 437-460.
6. HILL, J.R.C., the mine dump problem in Rhodisia.  
From: Rhodisia Agricultural Journal, Vol. 69 (4).
7. HILL, J.R.C. and W.F. NOTHARD, the Rhodesian approach to vegetating slimes dams.  
From: The South African Institute of Mining and Metallurgy, General Meeting and Colloquium on "The Construction of Slimes Dams", 1973.



8. HODDER, Richard L., innovations in planting techniques to diverse shrub cover on mine tailings.  
From: Tailing Disposal To-day, Vol. 2: Proceedings of the Second International Tailing Symposium, Denver, Colorado, May, 1978, Chapter 22 : pp. 461-470.
9. KENNEDY, Richard H., long-term stabilization of uranium mill tailings at inactive sites.  
From: Tailing Disposal To-day, Vol 2: Proceedings of the Second International Tailing Symposium, Denver, Colorado, May 1978: Chapter 23 : pp. 471-486.
10. LUDEKE, Kenneth L., vegetative stabilization of copper mine tailing disposal terms of Pima Mining Company.  
From: Tailing Disposal To-day. Proceedings of the First International Tailing Symposium, Tucson, Arizona, October 31, November 1, 2 and 3, 1972. Chapter 17 : pp. 377 - 410.
11. REPORT on vegetation cover of mine tailing dams and dumps.

Anonymous.

---

## GLOSSAIRE

---

**Angle de résistance au cisaillement** : L'angle d'obliquité maximal entre la contrainte résultante et la normale sur une surface dans un sol ou rocher.

**Antennes de drainage** : Un système de drainage formé de drains parallèles et étroits, mis dans un remblai à la place d'un tapis drainant continu

**Coefficient de perméabilité k** : Le débit d'eau en écoulement laminaire au travers d'une section unitaire d'un milieu poreux sous un gradient hydraulique et une température normalisée de 20°C.

**Coefficient de sécurité** : Le rapport de la résistance disponible au cisaillement à la contrainte de cisaillement sur la surface de rupture critique.

**Cohésion, C** : La partie de la résistance au cisaillement (S), indiquée par le terme C dans l'équation de Coulomb :  $S = C + P \tan \phi$ , où  $\phi$  est l'angle de la résistance au cisaillement. La cohésion constitue une force de liaison intergranulaire.

**Consolidation** : La partie de la réduction de volume d'une masse de sol résultant de l'expulsion de l'eau interstitielle sous application d'une charge.

**Déformation** : La variation des dimensions d'un corps ou le déplacement absolu d'un point d'un corps.

**Degré de saturation, Sr** : Le rapport du volume d'eau dans les vides d'un sol au volume total des vides.

**Dépôt** : Un remblai formé de stériles miniers ou industriels déposés et stockés à sec.

**Filtres** : Un matériau ayant une granulométrie bien distribuée et qui est plus perméable que le sol adjacent plus fin, agissant ainsi comme un drain et laissant l'eau s'écouler de la surface de contact entre la zone protégée et le filtre. Ce matériau doit avoir une granulométrie telle que ses vides sont suffisamment petits pour empêcher la migration de particules fines de sol à partir du sol protégé.

**Indice de compression,  $C_c$**  : Un indice indiquant le degré de compressibilité du sol, correspondant à la pente de la courbe du rapport des vides au logarithme de la pression effective.

**Indice de plasticité** : La différence entre la limite liquide et la limite plastique.

**Indices des vides, e** : Le rapport du volume des vides au volume solide d'une masse de sol.

**Limites d'Atterberg** :

- |                         |    |
|-------------------------|----|
| a) Limite de liquidité  | wl |
| b) Limite de plasticité | wp |
| c) Indice de plasticité | Ip |
| $Ip = WL - Wp$          |    |

- Limite de plasticité** : La plus faible teneur en eau, telle que déterminée par le test normalisé de la limite plastique, à laquelle le sol demeure plastique.
- Niveau de la nappe phréatique** : Le niveau au-dessous duquel les pores (interstices) et fissures de rocher et du sous-sol jusqu'à une profondeur indéfinie sont saturés d'eau.
- Porosité** : Le rapport en pourcentage du volume de vides d'une masse donnée de sol au volume total de cette masse de sol.
- Pression interstitielle** : La contrainte transmise par l'eau interstitielle.
- Puits de décompression** : Puits forés pour le contrôle de la pression interstitielle sous un remblai ou une pente de sol.
- Pulpe** : Minerai pulvérisé en suspension dans l'eau.
- Remblai de stériles** : Désigne tous les matériaux de rejets miniers ou industriels déposés sur une surface, à l'exclusion des matériaux déposés en souterrain aux fins de remplissage.
- Renard** : Le mouvement des particules de sol dû à des forces de percolation d'eau non équilibrées, produisant des bouillonnements et des voies d'érosion.
- Revanche** : La hauteur mesurée à partir du niveau d'eau jusqu'à la crête d'un remblai. La revanche minimale doit être mesurée à partir du niveau des plus hautes eaux exceptionnelles jusqu'à la crête d'un remblai.
- Rupture au cisaillement** : Rupture produite par des contraintes de cisaillement.
- Spigotage** : Un procédé généralement utilisé dans la méthode "amont" de construction des remblais de stériles. Ce procédé utilise des robinets et les boues de stériles sont déchargées par une série de robinets (spigots) disposés au long de la crête du remblai.
- Stériles** : Le produit de rejet d'une exploitation minière après extraction des matériaux utiles.
- Thixotropie** ; Lorsque certains matériaux sont pétris ou tassés sans variation de la teneur en eau, la cohésion décroît considérablement. Cet effet est connu comme thixotropie.

---

## GLOSSARY

---

**Angle of shearing resistance** : The maximum angle of obliquity between the normal and the resultant stress acting on a surface within a soil or rock.

**Atterberg limits** :

- a) Liquid Limit            wl
  - b) Plastic Limit           wp
  - c) Plasticity Index        Ip
- $I_p = w_l - w_p$

**Bund** : A stage in embankment construction.

**Cohesion, C**: The portion of the shear strength(S) indicated by the term C in Coulomb's equation:  $S = C + P \tan \phi$ , where  $\phi$  is the angle of shearing resistance. It has the nature of an intergranular binding force.

**Compression index, Cc** : An index indicating the compressibility of the soil, which represents the slope of the curve of void ratio versus logarithm of effective pressure.

**Consolidation** : That portion of the decrease in volume of a soil mass resulting from the expulsion of only the pore fluid when subjected to load.

**Deformation** : The change in linear dimension of a body or the absolute movement of a point on a body.

**Degree of saturation, Sr** : The ratio of the volume of water in the soil voids to the total volume of voids.

**Dump** : An embankment consisting of mine or industrial waste material (tailings) laid and stockpiled in the dry.

**Factor of safety** : The ratio of available shear strength to shear stress on the critical failure surface.

**Filters** : Well-graded material which is more permeable than the adjacent finer soil, so that it will act as a drain and freely conduct water away from the interface between the protected zone and the filter. It must have a gradation such that its voids are sufficient small to prevent the passage of the fine soil particles from the protected soil.

**Finger drains**: A drainage system which consists of parallel strips of narrow width of pervious drainage materials. (instead of a continuous drainage blanket).

**Freeboard** : The height measured from water level to the crest of embankment. The minimum freeboard should be measured from the maximum projected flood level to the crest of the embankment.

**Groundwater level (phreatic surface or water table)** : The level below which the pores and fissures of the rock and subsoil, down to indefinite depth are full of water.

**Hydrocycloning** : A procedure used for dam and embankment construction in which hydrocyclones or cyclones can be used to separate sands from the slime. A series of cyclones can be placed along the crest of the embankment or a group of cyclones can be mounted in parallel as a mobile unit which travels along the longitudinal axis of the dam.

**Impoundment** : An embankment consisting of mine or industrial waste material laid and stockpiled with water in a reservoir created by the coarse friction of the waste material (tailings) or borrow material.

**Liquefaction** : The sudden, large decrease of shearing resistance of a cohesionless soil caused by collapse of the soil structure, produced by shock or small shear strains, associated with sudden, but temporary increase of pore water pressure.

**Liquid limit,  $w_l$**  : The water content at which the soil exhibits a small shearing strength is taken to be the boundary between liquid and plastic behaviour and this water content is called liquid limit.

**Permeability coefficient,  $k$**  : The rate of discharge of water under laminar flow condition through a unit cross-sectional area of a porous medium under a unit hydraulic gradient and standard temperature (20° C).

**Photogrammetric mapping** : The mapping of surface exposures or geological structures done by photogrammetric techniques.

**Pipe drains** : A drainage system which consists of pipes in the embankment cross section.

**Piping** : The movement of soil particles as the result of unbalanced seepage forces produced by percolating water, leading to the development of boils or erosion channels.

**Plastic limit** : The lowest water content, as determined by the standard plastic limit test, at which a soil remains plastic.

**Plasticity index** : The difference between the liquid limit and the plastic limit.

**Pore pressure,  $u$**  : Stress transmitted through the pore water.

**Porosity** : The ratio usually expressed as a percentage of, (1) the volume of voids a given soil mass to (2) the total volume of the soil mass.

**Pulp** : Pulverized ore mixed in water.

**Relief wells** : Wells drilled for control of pore water pressure beneath embankment or soil slope.

**Shear failure** : Failure resulting from shear stresses.

**Spigotting** : A procedure generally used in the upstream method of construction for dams or tailings embankments for which spigots are employed and the tailing slurry is discharged for a series of spigots along the crest of dam or embankment. The slurry meanders in a series of loose streams that result in discontinuous horizontal stratification.

**Tailings** : The waste product from a milling operation in which the valuable materials have been recovered.

**Thixotropy** : When some materials are kneaded without alternating the water content, the cohesion decreases considerably. This effect is known as thixotropy.

**Void ration, e** : The ratio of void volume to solid in a soil mass.

**Wall** : A dam consisting of one or a series of successive embankments designed to impound water or slimes.

**Waste embankments** : Refers to all mine or industrial waste materials placed on surface, but excludes those materials placed underground as backfill.

---

## SYMBOLES

---

(voir *Dictionnaire Technique des Barrages*  
pages 193 à 195)

w — teneur en eau  
 $\gamma_s$  — poids volumique des particules solides  
 $\gamma$  — poids volumique du sol (humide)  
 $\gamma_{sat}$  — poids volumique du sol saturé  
 $\gamma_w$  — poids volumique du liquide interstitiel  
n — porosité  
 $\gamma_d$  — poids volumique du sol saturé  
Dr — densité relative; maintenant Id =  
= indice de densité  
e — indice des vides  
 $C_u$  — coefficient d'uniformité

---

## SYMBOLS

---

(See *Technical Dictionary on Dams*  
pages 193 to 195)

w — water content  
 $\gamma_s$  — unit weight solid particles  
 $\gamma$  — unit weight of soil (wet)  
 $\gamma_{sat}$  — unit weight of saturated soil  
 $\gamma_w$  — unit weight of pore liquid  
n — porosity  
 $\gamma_d$  — unit weight of dry soil  
Dr — relative density (formerly); now  
Id = density index  
e — void ratio  
 $C_u$  — uniformity factor

## AUTRES BULLETINS TECHNIQUES PUBLIÉS DANS CETTE SÉRIE (\*)

- Bulletin 15 - « Résistance des bétons au gel »  
1960-1981
- Bulletin 20 - « Guide et recommandations pour les essais sur les adjuvants tensioactifs pour les bétons des grands barrages »  
1968
- Bulletin 21 - Considérations générales pour l'auscultation des barrages en terre et en enrochement »  
1969
- Bulletin 22 - « Guide et recommandations sur les pouzzolanes et les laitiers pour utilisation dans les bétons des grands barrages »  
1972
- Bulletin 23 - « 1) Considérations générales sur l'auscultation des barrages en béton ».  
1972        2) Application des méthodes géodésiques à la détermination des mouvements des barrages »
- Bulletin 24 - « Guide et recommandations sur les adjuvants accélérateurs et retardateurs de prise pour utilisation dans le béton des grands barrages »  
1973
- Bulletin 25 - « Extensibilité des bétons pour grands barrages »  
1976-1981
- Bulletin 26 - « Méthodes pour déterminer les effets du retrait, du fluage et de la température sur les bétons des grands barrages »  
1976-1981
- Bulletin 27 - « Considérations sur le calcul sismique des barrages »  
1975-1981
- Bulletin 29 - « Rapport du Comité des Risques aux tiers découlant des grands barrages »  
1977
- Bulletin 30 - « Les méthodes des éléments finis appliquées aux calculs et à la conception des barrages »  
1978-1982
- Bulletin 31a - « Glossaire de termes relatifs aux barrages »  
1977-1982
- Bulletin 32a - « Masques amont en béton bitumineux pour barrages en terre et en enrochement »  
1977-1982
- Bulletin 33 - « Répertoire de symboles pour barrages »  
1979
- Bulletin 34 - « Guide CIGB du Système International d'Unités (SI) »  
1979
- Bulletin 35 - « Les barrages et l'environnement »  
1980
- Bulletin 36a - « Ciment utilisé pour le béton des grands barrages »  
1980-1982
- Bulletin 37 - « Une réussite les barrages et l'écologie »  
1981
- Bulletin 38 - « Emploi des étanchéités minces sur les barrages en remblai »  
1981
- Bulletin 39 - « Raccordement du masque amont avec la fondation et les rives »  
1981        (1<sup>er</sup> Complément au Bulletin 32a)
- Bulletin 40 - « Le béton armé de fibres »  
1982
- Bulletin 41 - « L'automatisation dans le contrôle de la sécurité des barrages »  
1982
- Bulletin 42 - « Noyaux bitumineux pour barrages en terre et en enrochement »  
1982        (2<sup>e</sup> Complément au Bulletin 32a)
- Bulletin 43 - « Résines synthétiques pour les revêtements de barrages »  
1982
- Bulletin 44 - « Bibliographie – Barrages et dépôts de stériles miniers et industriels »  
1982
- Bulletin 45 - « Manuel des barrages et dépôts de stériles »  
1983
- Bulletin 46 - « Sismicité et conception des barrages »  
1983

(\*) Les dates indiquent les éditions successives. Indice « a » : quand il y a mise à jour.

NB : Les Bulletins précédant le Bulletin 15 n'étaient pas des Bulletins Techniques.



## OTHER TECHNICAL BULLETINS AVAILABLE (\*)

- Bulletin 15 - "Frost resistance of concrete"  
1960-1981
- Bulletin 20 - "Guide and recommendations for tests on surface  
active admixture for concrete for large dams"  
1968
- Bulletin 21 - "General considerations applicable to instrumentation  
for earth and rockfill dams"  
1969
- Bulletin 22 - "Guide and recommendations on pozzolanas and slags  
for use in concrete for large dams"  
1972
- Bulletin 23 - "1) General considerations on instrumentation for concrete dams.  
2) Note on the application of geodetic methods  
to the determination of movements of dams"  
1972
- Bulletin 24 - "Guide and recommendations for accelerating and retarding  
admixtures for use in concrete for large dams"  
1973
- Bulletin 25 - "Extensibility of concrete for large dams"  
1976-1981
- Bulletin 26 - "Methods of determining effects of shrinkage,  
1976-1981 creep and temperature on concrete for large dams"
- Bulletin 27 - "A review of earthquake resistant design of dams"  
1975-1981
- Bulletin 29 - "Report from the Committee on Risks to Third Parties from Large Dams"  
1977
- Bulletin 30 - "Finite element methods in analysis and design of dams"  
1978-1982
- Bulletin 31a - "A glossary of words and phrases related to dams"  
1977-1982
- Bulletin 32a - "Bituminous concrete facings for earth and rockfill dams"  
1977-1982
- Bulletin 33 - "Compendium for dam symbols"  
1979
- Bulletin 34 - "ICOLD Guide for the International System of Units (IS)"  
1979
- Bulletin 35 - "Dams and the Environment"  
1980
- Bulletin 36a - "Cements for concrete for large dams"  
1980-1982
- Bulletin 37 - "Dam projects and environmental success"  
1981
- Bulletin 38 - "Use of thin membranes on fill dams"  
1981
- Bulletin 39 - "Upstream facing interface with foundations and abutments"  
1981 (1st Supplement to Bulletin 32a)
- Bulletin 40 - "Fiber reinforced concrete"  
1982
- Bulletin 41 - "Automated Observation for the Safety Control of Dams"  
1982
- Bulletin 42 - "Bituminous cores for earth and rockfill dams"  
1982 (2nd Supplement to Bulletin 32a)
- Bulletin 43 - "Synthetic resins for facings of dams"  
1982
- Bulletin 44 - "Bibliography - Mine and industrial tailings dams and dumps"  
1982
- Bulletin 45 - "Manual on tailings dams and dumps"  
1983
- Bulletin 46 - "Seismicity and dam design"  
1983

(\*) 2 dates : successive editions. Numbers marked "a" : where there is an updating.

NB : Bulletins before Bulletin No. 15 were not Technical Bulletins.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN  
*Publications scientifiques et littéraires*  
05002 GAP - Tél. : (92) 51.35.23  
Dépôt légal : 204 - Mars 1983

ISSN 0534-8293

**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>*