

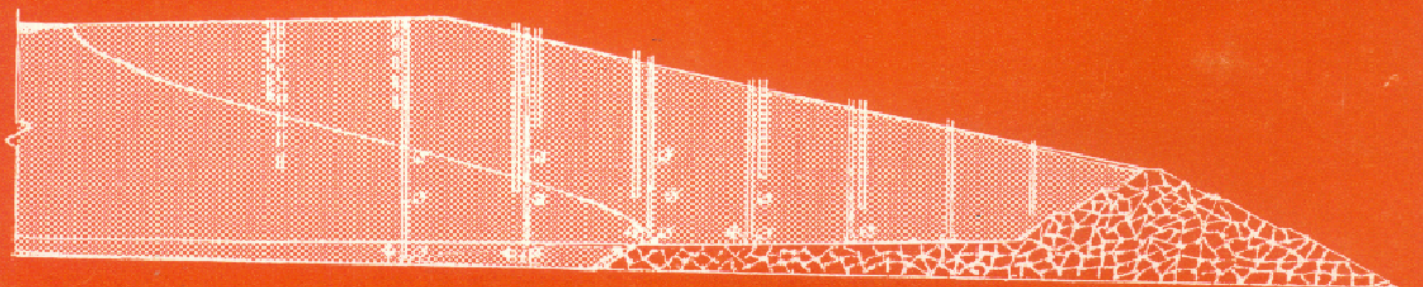
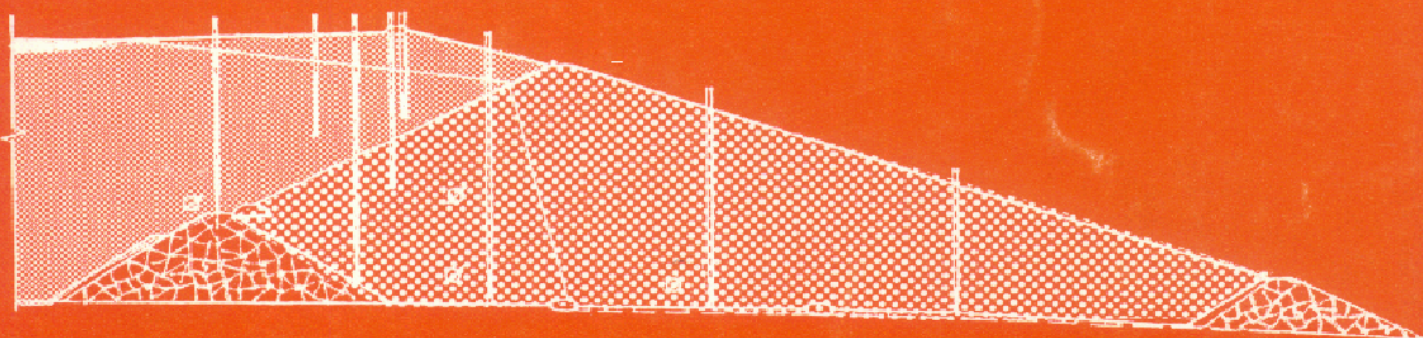
MONITORING OF TAILINGS DAMS

Review and recommendations

AUSCULTATION DES BARRAGES DE STERILES

Synthèse et recommandations

Bulletin 104



1996

Original text in English
French translation by Y. Le May.

*Texte original en anglais
Traduction en français par Y. Le May.*

MONITORING OF TAILINGS DAMS

Review and recommendations

AUSCULTATION DES BARRAGES DE STERILES

Synthèse et recommandations

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 53 75 16 22 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

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

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

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

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. BARRAGES DE STÉRILES
CONSTRUITS PAR LA
MÉTHODE AMONT
 3. BARRAGES DE STÉRILES
CONSTRUITS PAR LA
MÉTHODE AVAL
 4. BARRAGES DE STÉRILES
A RETENUE D'EAU
 5. AMÉLIORATION DE
L'AUSCULTATION DE
BARRAGES DE STÉRILES
EXISTANTS
 6. AUSCULTATION DES
BARRAGES DE STÉRILES
APRES FERMETURE
 7. TRAITEMENT, ANALYSE ET
INTERPRÉTATION DES
RÉSULTATS DES MESURES
 8. BIBLIOGRAPHIE

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. TAILINGS DAMS OF
UPSTREAM CONSTRUCTION
 3. TAILINGS DAMS OF
DOWNSTREAM
CONSTRUCTION
 4. TAILINGS DAMS OF WATER
RETENTION TYPE
 5. IMPROVEMENT OF EXISTING
TAILINGS DAM
MONITORING
 6. MONITORING OF CLOSED
TAILINGS DAMS
 7. DATA PROCESSING
AND EVALUATION
 8. BIBLIOGRAPHY

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	8
1. INTRODUCTION	12
2. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AMONT	20
2.1. Prescriptions relatives à l'auscultation	20
2.2. Débit de percolation	22
2.3. Ligne de saturation	24
2.4. Pression interstitielle	28
2.4.1. Mesures de pression interstitielle	28
2.4.2. Étalonnage in situ des piézomètres	30
2.4.3. Détermination du niveau des piézomètres	32
2.4.4. Câbles	34
2.4.5. Protection des appareils de mesure contre la foudre et la surtension	34
2.5. Séismicité	36
2.6. Pression interstitielle sous chargement dynamique et liquéfaction	38
2.7. Déplacements verticaux	38
2.8. Déplacements horizontaux	40
2.9. Tassements différentiels dans le remblai	42
2.10. Pression totale	42
2.11. Échantillons et essais de mécanique des sols en laboratoire	44
2.12. Détermination in situ des propriétés de mécanique des sols	44
2.13. Méthode de mise en place des stériles	46
2.14. Exemple	48
3. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AVAL ..	56
3.1. Prescriptions relatives à l'auscultation	56
3.2. Débit de percolation	58
3.3. Ligne de saturation	58
3.4. Pression interstitielle	60
3.5. Séismicité et pression interstitielle induite	60
3.6. Déplacements verticaux et horizontaux	62
3.7. Pente du talus aval du barrage	62

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	9
1. INTRODUCTION	13
2. TAILINGS DAMS OF UPSTREAM CONSTRUCTION	21
2.1. Monitoring requirements	21
2.2. Seepage discharge	23
2.3. Phreatic surface	25
2.4. Pore pressure	29
2.4.1. Pore pressure measurements	29
2.4.2. On-site calibration of the piezometers	31
2.4.3. Estimation of piezometers level	33
2.4.4. Cables	35
2.4.5. Lightning and overvoltage protection of the instrumentation	35
2.5. Seismicity	37
2.6. Dynamic pore pressure and liquefaction	39
2.7. Vertical movements	39
2.8. Horizontal movements	41
2.9. Differential settlements in the embankment	43
2.10. Total pressure	43
2.11. Sampling and soil mechanics laboratory tests	45
2.12. In situ determination of soil mechanics properties	45
2.13. Tailings placement procedures	47
2.14. Case history	49
3. TAILINGS DAMS OF DOWNSTREAM CONSTRUCTION	57
3.1. Monitoring requirements	57
3.2. Seepage discharge	59
3.3. Phreatic surface	59
3.4. Pore pressure	61
3.5. Seismicity and induced dynamic pore pressure	61
3.6. Vertical and horizontal movements	63
3.7. Inclination of the downstream slope of the dam	63

3.8. Tassements différentiels dans le remblai	62
3.9. Pression totale	62
3.10. Échantillons et essais de mécanique des sols en laboratoire	62
3.11. Méthode de mise en place des stériles	64
3.12. Exemple	64
4. BARRAGES DE STÉRILES A RETENUE D'EAU	70
5. AMÉLIORATION DE L'AUSCULTATION DE BARRAGES DE STÉRILES EXISTANTS	72
6. AUSCULTATION DES BARRAGES DE STÉRILES APRES FERMETURE	78
7. TRAITEMENT, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES MESURES	80
8. BIBLIOGRAPHIE	84

3.8. Differential settlements in the embankment	63
3.9. Total pressure	63
3.10. Sampling and soil mechanics laboratory tests	63
3.11. Tailings placement procedure	65
3.12. Case history	65
4. TAILINGS DAMS OF WATER RETENTION TYPE	71
5. IMPROVEMENT OF EXISTING TAILINGS DAM MONITORING	73
6. MONITORING OF CLOSED TAILINGS DAMS	79
7. DATA PROCESSING AND EVALUATION	81
8. BIBLIOGRAPHY	84

AVANT-PROPOS

L'auscultation des barrages en remblai a fait d'énormes progrès au cours de ces dernières années; aussi, tous les nouveaux barrages sont-ils maintenant équipés d'un réseau complet d'appareils de mesure, un grand nombre de vieux barrages en remblai recevant également des appareils pour suivre leur comportement dans le temps. Par contre, l'auscultation des barrages de stériles est très peu connue.

Les progrès réalisés dans la conception des barrages en remblai résultent, pour une grande part, de l'étude de leur comportement, en cours de construction et d'exploitation, au moyen des mesures d'auscultation. Cela manque gravement pour les barrages de stériles.

Du fait de la variété des sites et des matériaux de construction, chaque barrage en remblai est un cas particulier et des dispositifs d'auscultation sont indispensables pour évaluer son comportement et se prémunir contre des mouvements inacceptables ou des ruptures. Cela s'applique encore plus aux barrages de stériles, où il n'y a pas deux sites identiques et où les caractéristiques des stériles et les méthodes de dépôt changent au cours de la construction du barrage.

Le présent Bulletin n'est pas destiné à donner des informations détaillées sur les différents types d'appareils d'auscultation actuellement disponibles sur le marché, mais se concentre sur la différence d'approche à laquelle conduit l'auscultation des barrages de stériles. L'attention est spécialement attirée sur l'importance des mesures de percolation et la nécessité d'une automatisation permettant des enregistrements continus, sur les méthodes de mesure de la position de la ligne de saturation, cette mesure, capitale dans les barrages de stériles, présentant quelques différences par rapport à celle mise en œuvre pour les barrages en remblai. Les piézomètres du type « à corde vibrante », avec lecture à distance et enregistrement automatique, ont fait leurs preuves et sont recommandés (possibilité de ré-étalonnage et de contrôle de la lecture zéro *in situ*). Les séismes pouvant avoir de graves effets sur les barrages de stériles, il est nécessaire de mettre en place des moyens automatiques pour observer le comportement sismique du barrage; les observations faites au cours de séismes de faible intensité peuvent indiquer les modifications nécessaires pour améliorer la sécurité vis-à-vis de séismes futurs plus forts. Des recommandations sont données sur les méthodes permettant de déterminer, à partir d'essais *in situ*, les propriétés des stériles mis en dépôt.

Les méthodes de mesure des tassements et des déplacements horizontaux sont discutées. On examine le problème de la mesure des pressions totales au moyen de groupes de cellules de pression des terres; mais leur utilisation dans les stériles présente des difficultés, des résultats significatifs sont difficiles à obtenir et, excepté dans des cas spéciaux, cela ne vaut pas la peine d'installer de tels appareils.

Il y a des différences marquées entre le comportement des barrages construits par la méthode amont et celui des barrages construits par la méthode aval; on décrit les types différents d'appareils de mesure pour ces deux catégories de barrages. Des exemples concernant des grands barrages des deux types sont donnés. Il

FOREWORD

Instrumentation for embankment dams has now advanced to such a stage that it is accepted practice for all new dams to be fitted with a comprehensive array of instruments and many older embankment dams are being fitted with instrumentation to check their continuing behaviour. Yet instrumentation in tailings dams is almost unknown.

Much of the progress that has been made in the design of embankment dams has stemmed from the study of the behaviour of dams during construction and operation, made possible by the observations available through instrumentation. This aspect is sorely missing for tailings dams.

Because of variation of site and construction material, each embankment dam is an individual, and instrumentation is essential to assess behaviour and guard against unacceptable movements or failures. This applies to an even greater extent with tailings dams, where not only are no two sites the same, but the properties and methods of deposition of the tailings vary, even during the construction of an individual dam.

This Bulletin is not intended to give the fine details of the many different types of instrumentation that are now commercially available, but concentrates on the difference of approach necessary when considering the instrumentation for tailings dams. Sound advice is given about the importance of seepage measurements and the need for automation to provide continuous records, methods for measuring the position of the phreatic surface, showing the difference of approach from that with embankment dams in this, for tailings dams, vital measurement. Remote reading, vibrating wire type piezometers, which can readily be automatically recorded, made lightning proof and with the ability for re-calibration and checking of zero reading while in situ, are recommended. Earthquakes can have such serious effects on tailings dams that automatic means are necessary to observe the result of any seismic shaking on the behaviour of the dam : results from minor events can show modifications necessary to provide greater security against more serious events that may occur. Advice is given about methods to determine the properties of the placed tailings from in situ tests.

Methods are discussed for measuring both settlements and horizontal movements. Consideration is given to apparatus for the measurement of total pressures by use of clusters of earth pressure cells, but the difficulties of using them in tailings leads to the suggestion that it is very difficult to obtain meaningful results and that, except in special cases, it is not worth installing them.

There are marked differences between the behaviour of tailings dams built by the upstream and downstream methods, and the different types of instrumentation needed for the two types are described. Examples are given by case histories of large dams of both types. It is recommended that aerial surveys should be made of

est recommandé d'exécuter des restitutions par photos aériennes du barrage et de la retenue de stériles, au moins une fois par an au cours de la longue période de construction, afin d'obtenir des profils au sol; la stéréophotographie sera appliquée pour surveiller les parties du barrage et de la retenue non accessibles à pied.

Un chapitre traite de l'amélioration de l'auscultation de barrages existants ou de la mise en place d'appareils de mesure dans des barrages qui n'en possédaient pas jusqu'alors.

Un dernier chapitre est consacré au traitement des données et à l'interprétation des résultats.

Le Bulletin s'adresse à tous ceux concernés par les barrages de stériles, et particulièrement à ceux chargés de leur conception et de leur exploitation. Les recommandations données permettent d'améliorer la sécurité de ces barrages et leurs méthodes d'exploitation, grâce à l'étude de leur comportement.

La première rédaction du Bulletin fut effectuée par le Professeur Abadjiev qui a une très grande expérience de la conception et de l'étude du comportement de barrages de stériles de divers types. Nous remercions vivement le Professeur Abadjiev, les Membres du Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels qui ont fait part de précieux commentaires, ainsi que les Comités Nationaux qui ont présenté d'utiles observations sur le projet final, toute cette collaboration ayant permis d'établir un Bulletin particulièrement intéressant.

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

the dam and its impoundment at least once a year during the long construction, to enable detailed contours to be constructed from pairs of stereoscopic photographs, giving the opportunity for inspecting the condition of parts of the dam and impoundment that cannot be reached on foot.

A section deals with the improvements that can be made to existing monitoring, which in many dams is none existent, so that it may be necessary to fit instruments to existing dams.

A final section deals with data processing and evaluation of the results.

This Bulletin is recommended for all those with an interest in tailings dams, particularly those responsible for design and operation. By following the advice given, not only will the safety of your tailings dam be enhanced, but a study of the dam behaviour will enable operating methods to be improved and made more efficient.

This Bulletin was first drafted by Professor Abadjiev who has had a vast experience in the design and analysis of large tailings dams of many types. We are grateful to him and to the members of the Committee on Mine and Industrial Tailings Dams who have added valuable comments, as well as to those many Member Countries of ICOLD who have read the final draft and added their constructive comments, making the document into a well rounded and valuable Bulletin.

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

1. INTRODUCTION

La destination des barrages de stériles, leur structure, la technique et la durée de construction, leur comportement diffèrent beaucoup de ceux des barrages en terre créant des retenues d'eau. Il en résulte que leur auscultation est également différente, bien que quelques aspects présentent une certaine similitude.

L'auscultation des barrages en terre et de leurs fondations étant traitée dans les Bulletins CIGB 41, 60, 68 et 87, seules les questions spécifiques aux barrages de stériles sont examinées dans le présent Bulletin.

Le but de l'auscultation est de mesurer des phénomènes ayant une influence majeure sur le comportement du barrage, et on a souvent indiqué que la personne la plus qualifiée pour décider du dispositif d'auscultation était le concepteur du barrage : il connaît les difficultés du site et les problèmes que risquent de poser les types de stériles à traiter. Il peut déterminer les paramètres à mesurer et, avec l'assistance d'un expert en auscultation qui connaît les derniers types d'appareils de mesure disponibles sur le marché, il peut concevoir le dispositif d'auscultation le plus efficace et le plus économique. Le type d'appareil en définitive le moins coûteux est souvent le plus cher à l'achat, car la fiabilité est essentielle et le coût du dispositif d'auscultation dépend principalement de l'installation, de la lecture des appareils et de l'analyse de ces lectures.

L'évolution des appareils d'auscultation des barrages en remblai est associée aux travaux d'étude des ruptures et du comportement des barrages. Des appareils furent conçus et fabriqués par des organismes de recherches, installés et lus par leur personnel, travaillant en collaboration avec les concepteurs et les constructeurs des barrages. Des fabricants d'appareils apparurent, copiant tout d'abord les dispositifs mis au point par les organismes de recherches, puis concevant eux-mêmes leurs appareils. Actuellement, il existe de nombreuses sociétés commerciales fabriquant des appareils pour des mesures géotechniques *in situ*, et il y a eu une succession de conférences traitant de ce sujet. En ce qui concerne les barrages en remblai, une étape a été atteinte lorsque la « conception » du dispositif d'auscultation a été établie à partir du catalogue des fabricants, en présentant une sélection d'appareils de mesure sur quelques coupes transversales du barrage proposé, sans se soucier du but de l'auscultation. Heureusement, il n'est pas nécessaire pour les appareils d'auscultation des barrages de stériles de passer par cette évolution longue et laborieuse : le concepteur de barrages de stériles bénéficie des connaissances accumulées et, avec l'aide d'un spécialiste en appareils d'auscultation, peut rapidement choisir les appareils les plus appropriés et les plus fiables pour mesurer les caractéristiques particulières qu'il a identifiées.

Les barrages de stériles présentent les caractéristiques suivantes qui ont également une influence sur leur auscultation :

- leur construction peut s'étaler sur une période de 20 à 30 ans;

1. INTRODUCTION

The purpose of tailings dams, their structure, the technique and period of construction and their behaviour differ substantially from those of water retaining earthfill dams. Therefore the instrumentation and monitoring also differ, although there are considerable similarities.

Since instrumentation and monitoring of earthfill dams and their foundation are treated in detail in ICOLD Bulletins 41, 60, 68 and 87, we will consider here instrumentation and monitoring of tailings dams only in so far as they differ from those of earthfill dams.

The purpose of instrumentation is to measure phenomena crucial to the behaviour of the dam, and it has often been said that the person best suited to decide on the instrumentation layout is the designer of the dam : he knows the difficulties of the site and the problems likely to be encountered with the types of tailings to be used. He can decide what he needs to measure, and with the assistance of an instrumentation consultant, who knows the latest types of instruments commercially available, can design the most effective and most economical layout of instrumentation. The cheapest type of instrument to use is often the most expensive to buy, because reliability is essential and the cost of instrumentation is mainly in the installation, reading the instruments and analysing those readings.

The development of instrumentation for embankment dams began mainly with research work in the study of failures and the behaviour of the dams. Instruments were designed and manufactured by research institutions, installed and read by research staff, working in conjunction with the designers and constructors of the dams. Specialist manufacturers soon came into existence, initially copying equipment made by the research institutes, then making instruments to their own design. Now there are many commercial firms manufacturing equipment for field measurements in geotechnical engineering, and there have been a succession of conferences dealing with this subject. A stage was reached with embankment dams, when the so called " design " of the instrumentation was made from the manufacturers catalogue, spreading a selection of instruments across a few cross sections of the proposed dam, without thought being given to the purpose of the instrumentation. Fortunately there is no need for the instrumentation of tailings dams to have to go through this long and painful development : the tailings dam designer has the benefit of the accumulated knowledge, and with the aid of an instrumentation advisor, can quickly choose the most suitable and most reliable instruments to monitor the special characteristics that he has identified.

Tailings dams possess the following features which also determine the requirements for satisfactory instrumentation and monitoring :

- construction may continue for 20 to 30 years;

– à la différence des barrages en terre construits à partir de matériaux spécialement sélectionnés, ils sont généralement constitués de matériaux inappropriés, dont les caractéristiques peuvent varier défavorablement au cours des diverses étapes de construction;

– la modification des propriétés des matériaux conduit parfois à un changement de la technique de mise en dépôt et, par conséquent, à une modification de structure;

– les problèmes des barrages de stériles sont encore insuffisamment étudiés par rapport à ceux des barrages en terre;

– ils tendent à avoir un impact négatif sur l'environnement;

– les stériles sont souvent des matériaux chimiquement actifs et/ou subissent une pollution chimique lors des opérations de traitement;

– certaines mesures d'auscultation sont à exécuter en des endroits inaccessibles tout le temps ou presque, ce qui nécessite un contrôle à distance;

– les grandes dimensions des barrages de stériles conduisent à de longs câbles de liaison, ce qui peut limiter le choix des appareils;

– la granulométrie, les faibles densité et cohésion des matériaux peuvent conduire au développement de pressions interstitielles élevées lors de séismes, ce qui peut provoquer une liquéfaction; la mesure de la secousse sismique et des pressions interstitielles sous chargement dynamique requiert un enregistrement automatique, qui présente un certain nombre d'autres avantages.

Ces caractéristiques nécessitent des dispositifs spéciaux et une installation adéquate. L'exploitation complexe des barrages de stériles exige également une surveillance journalière et des observations visuelles pour éviter toutes ruptures.

Les objectifs de l'auscultation des barrages de stériles sont les suivants :

– contrôle continu de la sécurité de l'ouvrage;

– vérification des hypothèses sur les propriétés des matériaux;

– vérification de la validité des hypothèses de projet;

– évaluation des méthodes de calcul;

– étude de l'influence des divers paramètres sur le comportement de l'ouvrage;

– collecte de données au cours de la longue période de construction en vue de connaître les propriétés réelles des matériaux et l'effet de divers facteurs, tels que percolation, pression interstitielle, comportement sous chargement dynamique, technique de construction, etc... sur la sécurité des barrages de stériles. A partir de ces données, on estimera périodiquement la stabilité du barrage à sa hauteur définitive, avec modification, si nécessaire, de la conception de l'ouvrage.

La longue période de construction et les conditions hostiles nécessitent un matériel de mesure de pérennité satisfaisante. Malheureusement, seul un petit nombre des appareils disponibles sur le marché sont suffisamment robustes et fiables pour donner des lectures précises sur une longue période. De ce fait, une vérification in situ des appareils de mesure est nécessaire. Certains d'entre eux, de

– unlike the selected suitable material used for earthfill dams, they usually have to be built from what might be regarded as unsuitable material, with properties that may vary unfavourably during the various stages of construction;

– change of material properties could also lead to a change of deposition technique and hence to a change of the structure itself;

– tailings dams problems are still insufficiently studied compared with those of earthfill dams;

– they tend to have a negative effect on the environment;

– in many cases tailings are a chemically active material and/or are polluted by chemicals from the recovery process;

– some of the measurements will have to be made at positions that may be inaccessible either entirely or during most of the construction time, so that remote reading is required;

– the large size of tailings dams leads to long connecting cables which may limit the choice of instrument;

– the particle size distribution, the low density and low cohesion may cause the development of high dynamic pore pressures during earthquake, leading to liquefaction. Measurement of seismic shock and dynamic pore pressure require automatic recording, which also has a number of other advantages.

These features require special systems and adequate installation. The complex operation of tailings dams also requires adequate daily control and visual observation to prevent uncontrolled developments.

The aims of tailings dams instrumentation and monitoring are :

– continuous checking of the structure's safety;

– checking the assumed properties of the materials;

– testing the validity of the design assumptions;

– assessment of the calculation methods;

– study of the influence of the various parameters on the behaviour of the structure;

– collection of data during the long construction period to determine the actual properties of the materials in situ and the evaluation of the effect of the various factors, such as seepage, pore pressure, dynamic pore pressure, construction technique, etc. on the safety of the tailings dam. On the basis of this data periodical prognosis of the dam stability at its final height must be done and the design amended as required.

The long construction period and the adverse conditions require instrumentation of adequate durability. Unfortunately, only a small proportion of the commercially available equipment is sufficiently robust and reliable to give accurate readings for a long period. Because of this, on-site checking of the instrumentation is required. Instrumentation of limited life has to be replaced with new instrumenta-

durabilité limitée, doivent être remplacés par des appareils neufs dont l'installation dans l'ouvrage demande beaucoup d'attention. Si la position de l'appareil n'est pas accessible, il est souhaitable d'installer d'autres appareils.

Les grandeurs à mesurer, les types d'appareils de mesure, le nombre de dispositifs, leur emplacement et la fréquence des mesures dépendent du type de barrage de stériles, de sa hauteur, de son volume, de la vitesse de montée du remblai, du site, des conditions géologiques et topographiques, de la protection de la population, des contraintes liées à l'environnement, ainsi que de l'importance relative des divers facteurs pour un ouvrage donné. Tous ces facteurs déterminent également l'enregistrement, le traitement et l'analyse des données d'auscultation, la présentation et l'interprétation des résultats, ainsi que l'évaluation du comportement de l'ouvrage.

La surveillance des barrages de stériles comprend :

- 1) des mesures concernant directement la sécurité;
- 2) des mesures destinées à évaluer la stabilité au stade atteint et pour la hauteur définitive;
- 3) des mesures de paramètres techniques en vue d'optimiser les méthodes de mise en dépôt des stériles;
- 4) des mesures destinées à contrôler le bilan hydraulique et la pollution;
 - pluie, neige, débit de la rivière, crue,
 - évaporation,
 - pertes d'eau,
 - eau interstitielle dans les stériles mis en dépôt,
 - eau évacuée de la retenue (inévitables lors des crues),
 - vitesse du vent et toutes mesures faites dans une station météorologique.

Avant le début de la construction, l'eau de la rivière et l'eau de la nappe phréatique seront analysées afin d'obtenir des données de base; l'effet des travaux miniers sur la qualité de l'eau à l'aval pourra ainsi être évalué. Les analyses concernant la pollution de l'eau à l'aval du dépôt de stériles seront effectuées en trois endroits : 1) eau de surface, constituée par l'eau de percolation provenant du barrage de stériles; 2) eau de la nappe phréatique influencée par les percolations provenant de la retenue de stériles; 3) eau de la rivière à l'aval du barrage. Si le niveau de pollution est inacceptable, après dilution dans la rivière en période d'étiage estival, l'eau de la nappe phréatique et l'eau de surface provenant des percolations doivent être recueillies pour retour au bassin ou à l'usine de traitement. Les analyses de l'eau de percolation porteront sur : la turbidité, la teneur en éléments solides, la composition chimique, les métaux lourds et le pH.

Les connaissances et l'expérience en matière de barrages de stériles sont moins développées que celles acquises dans le domaine des barrages en terre. L'étude du comportement des barrages de stériles à partir des résultats d'auscultation permet également de faire progresser la technique de ces ouvrages. De telles études fournissent des informations quantitatives pour les projets futurs, et conduisent à des

tion, which must be suitably installed inside the tailings dam. If the position of the instrument is not accessible, it may be wise to install additional instruments.

The behaviour to be monitored, the type of instrumentation, the number of devices and their positions, together with the frequency of measuring, depend on the type of tailings dam, its height, volume, rate of raising, site, geological and topographic conditions, the protection of the population, the environmental requirements and on the relative importance of the various factors for a given project. These determine also the recording, processing, analysis of the monitored data, the presentation and interpretation of the results and the evaluation of the monitored performance.

The following observations should be carried out for tailings dams :

1. Measurements directly concerning the safety.
2. Measurements for evaluating the stability at present and at maximum height.
3. Measurement of the technological parameters designed to optimize the tailings deposition techniques.
4. Measurements designed to control the water balance and the pollution :
 - rainfall, snow, river water inflow, floods;
 - evaporation;
 - water losses;
 - volume of water in the pores of the deposited tailings;
 - discharge from the reservoir (inevitable during floods);
 - wind velocity and all measurements obtained by a weather station.

Before construction begins, the river water and the groundwater should be tested to give base values, so that the effect of the mining operation on the downstream water quality can be assessed. Tests for water pollution downstream of the tailings impoundment should be performed at three places : 1. surface water, formed by the seepage water from the tailings dam; 2. ground water, influenced by the seepage from the tailings impoundment, and 3. river water downstream of the dam. If the pollution is to an inadmissible degree after dilution in the river during summer time low flow, the groundwater and the seepage surface water must be collected and recycled back to the pond or to the processing plant. The seepage water should be observed for turbidity and tested for solid content, chemical composition, heavy metals and pH value.

The knowledge and experience in tailings dams are not so well developed as these in earth dams. Studying the performance and behaviour of the tailings dams and the instrumentation data are also necessary research for the advancement of the state-of-the-art. Such research provides quantitative information for future design. It leads to advance in construction techniques, more economic operation,

progrès dans les techniques de construction, à une exploitation plus économique, à une amélioration des concepts de projet et à une meilleure compréhension des causes et mécanismes de rupture.

Le Bulletin CIGB « Guide des Barrages et Retenues de Stériles : Conception, Construction, Exploitation et Réhabilitation » donne plus d'informations sur les barrages de stériles.

Le choix des appareils de mesure et les diverses opérations d'auscultation dépendent beaucoup du type de barrage de stériles et seront traités séparément ci-après pour chaque type d'ouvrage.

improved design concepts and to a better understanding of the reasons and mechanisms of failure.

More information about tailings dams can be obtained from the ICOLD Bulletin "A Guide to Tailings Dams and Impoundments: Design, Construction, Use and Rehabilitation".

Instrumentation and monitoring depend substantially on the type of tailings dam, therefore each type will be discussed separately.

2. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AMONT

2.1. PRESCRIPTIONS RELATIVES A L'AUSCULTATION

La méthode classique permettant d'obtenir les matériaux grossiers des stériles pour la construction du barrage consiste à utiliser une plage. Les stériles se répandent régulièrement sur la plage depuis la crête du barrage, et s'écoulent lentement sur la largeur de la plage en direction de la retenue. Les éléments les plus gros se déposent les premiers, puis successivement les matériaux de plus en plus fins jusqu'à ce que les éléments les plus fins atteignent la retenue avec l'eau de transport. Le matériau déposé présente ainsi une diminution de perméabilité, de densité et de résistance au cisaillement, ainsi qu'une augmentation de compressibilité, au fur et à mesure que la distance depuis la crête du barrage augmente. Les stériles mis en dépôt par voie hydraulique sont très lâches, ce qui conduit à des déformations verticales ultérieures importantes, en particulier à proximité de la retenue. La faible densité initiale et les grandes déformations conduisent à une importante modification non linéaire des propriétés mécaniques des matériaux en place sous l'effet de l'augmentation de la charge. La méthode de mise en dépôt provoque une structure en couches et une anisotropie de toutes les propriétés mécaniques des stériles, en particulier de la perméabilité.

Les mesures recommandées pour les barrages de stériles construits par la méthode amont sont les suivantes :

1) Mesure et inspection visuelle journalière de tous les facteurs influençant directement la sécurité du barrage :

- largeur de la plage qui devra être aussi grande que possible;
- hauteur du barrage au-dessus du niveau d'eau de la retenue (revanche);
- débit de percolation à travers le barrage, la fondation et les appuis;

- position de la ligne de saturation et risque d'émergence sur le talus;

- pression interstitielle;
- déplacements horizontaux et verticaux de la crête du remblai d'amorce et du talus aval;
- sismicité et pression interstitielle induite;
- méthodes de mise en place des stériles.

2) Mesure et contrôle de tous les facteurs intervenant dans l'évaluation de la stabilité du barrage à chaque étape de construction et, en particulier, lorsque la hauteur définitive de l'ouvrage est presque atteinte :

- répartition et zonage des stériles mis en dépôt;

2. TAILINGS DAMS OF UPSTREAM CONSTRUCTION

2.1. MONITORING REQUIREMENTS

The traditional way for obtaining the coarsest fraction from the tailings for dam construction, is with a beach. Tailings spread evenly on to the beach from the dam crest, flow slowly across its width towards the pond. The largest size particles settle out first, with successively smaller particles settling out until only the finest slimes are left to go, with the transportation water, into the pond. This causes the deposited material to decrease in permeability, density and shear strength, as well as to increase in compressibility, with distance upstream from the dam crest. The hydraulically deposited tailings are very loose, causing subsequent vertical deformations to be significant, especially in the vicinity of the pond. The low initial density and the large deformations lead to a considerable nonlinear change of all soil-mechanics properties with load increase. The method of deposition causes a layered structure to form producing anisotropy of all the mechanical properties and particularly of the permeability of the tailings.

The following types of measurements of an upstream tailings dam are recommended :

1. Measurement and daily visual inspection of all factors directly influencing the actual security of the dam :

- beach width, which should be as large as possible;
- amount that the dam crest is above pond water level (freeboard);
- seepage discharge through the dam itself, through the foundation and abutments;
- position of the phreatic surface and any danger that it might emergence on the slope;
- pore pressure;
- horizontal and vertical movement of the starter dam crest and of the downstream slope;
- seismicity and induced dynamic pore pressure;
- all tailings placement procedures.

2. Measurement and testing of all factors connected with the evaluation of stability at every stage of construction and especially as the final maximum height is approached :

- distribution and zoning of the deposited tailings,

- pression interstitielle;
- comportement des stériles dans chaque zone et non-linéarité de leurs propriétés mécaniques (densité, résistance au cisaillement, compressibilité, consolidation) sous l'effet de l'augmentation des charges, déduits d'essais en laboratoire et *in situ*;
- tassement différentiel, enregistré par des dispositifs de mesure de déplacement interne;
- pression totale;
- sismicité, pression interstitielle induite et caractéristiques dynamiques des stériles mis en dépôt.

La consolidation, le tassement et la stabilité correspondant à la hauteur définitive du barrage doivent être vérifiés au cours des années de construction du barrage; si nécessaire, la technique de construction et la structure de l'ouvrage seront améliorées au moyen de drains correctement situés, de risbermes, en inclinant les talus, en élargissant la plage non submergée, en utilisant des hydrocyclones, etc...

3) Mesures servant à améliorer les techniques de remblayage hydraulique :

- largeur de la plage;
- granulométrie initiale des stériles;
- densité de la boue;
- débit de boue à la sortie de chaque buse de déversement;
- répartition des stériles transversalement à la plage, en fonction de la granulométrie, de la densité et des propriétés mécaniques. On peut obtenir une répartition optimale des stériles mis en dépôt et une amélioration de la stabilité en modifiant le débit de la boue aux points de déversement et sa densité (dilution avec de l'eau ou épaissement au moyen d'hydrocyclones), ou en diminuant la distance entre les buses de déversement.

Pour les divers éléments à contrôler, l'auscultation peut faire appel aux méthodes et appareils suivants :

2.2. DÉBIT DE PERCOLATION

Toute l'eau de percolation sera collectée et le débit mesuré au moyen de seuils de jaugeage avec entaille en V, de forme rectangulaire, ou de forme trapézoïdale. On peut utiliser des récipients calibrés pour mesurer les faibles débits.

Le débit de percolation est l'élément le plus important à mesurer. Il permet de mettre en évidence toute rupture grave dans le barrage de stériles, une érosion interne dont les conséquences peuvent être sérieuses si des mesures correctives ne sont pas prises en temps voulu. Cette mesure sera automatisée et les lectures seront enregistrées sans interruption dans une salle de contrôle. Il convient de mesurer séparément le débit correspondant à chaque drain ou zone, afin de déterminer plus facilement l'emplacement de chaque accroissement des fuites pouvant traduire une érosion.

Il importe que les barrages de stériles soient bien drainés afin d'éloigner, dans toute la mesure du possible, la ligne de saturation du talus aval, de réduire les

- pore pressures;
- behaviour of the tailings deposited in every zone and non-linearity of the soil-mechanics properties (density, shear strength, compressibility, consolidation) with the increase of the load applied, derived from the result of laboratory and in-situ tests;
- differential settlement, registered by the internal movement measuring devices;
- total pressures;
- seismicity and dynamic pore pressure and dynamic characteristics of the deposited tailings.

The consolidation, the settlement and the stability at the final height are to be checked during the years of dam rising and if necessary the construction technique and the structure are to be improved by means of properly placed drains, berms, slope inclinations, maintaining a wider nonsubmerged beach, using hydrocyclones etc.

3. Measurements which serve to improve the hydraulic filling techniques :

- beach width;
- initial coarseness of the tailings,
- slurry density,
- slurry discharge from every spigotting outlet,
- distribution of the deposited tailings across the beach according to coarseness, density and soil-mechanics properties. Optimum distribution of the deposited tailings and improvement of the stability could be obtained by changing the pulp discharge from the spigotting outlets and the pulp density (dilution with water or thickening by hydrocyclones) or decreasing the distance between the spigotting outlets.

Monitoring of the measured factors can be carried out by the following instruments and methods :

2.2. SEEPAGE DISCHARGE

All seepage water should be collected and the discharge measured by weirs of V-notch, rectangular, or trapezoidal type. Calibrated containers might be used to measure low discharges.

Seepage discharge is the most important factor which has to be measured. It provides evidence of any serious failure in the tailings dam. It is indicative of internal erosion in the dam body with grave consequences if all necessary measures are not taken in due time. This measurement should be automated and the readings recorded without interruption in the control room. It is appropriate to register separately the discharge coming from each drain and place, so as to be able to determine more easily the location of any increase of seepage and the possible occurrence of erosion.

It is essential for tailings dams to be well drained, to keep the phreatic surface as far away as possible from the downstream slope, to reduce pore pressures and to

pressions interstitielles et de diminuer le risque de liquéfaction. Le drainage augmente le débit de percolation qui est plus élevé que celui des barrages en terre. Cependant, il n'y a pas de danger s'il existe des filtres et drains fonctionnant bien, et si l'eau de percolation est recueillie et retournée à la retenue du barrage ou à la station de traitement. Des recommandations sur la conception du drainage des barrages de stériles sont données dans le Bulletin CIGB n° 97.

Les stériles sont très vulnérables à l'érosion interne et de surface, ce qui souligne l'importance de la mesure et de l'analyse des percolations.

2.3. LIGNE DE SATURATION

Le niveau de la ligne de saturation est de toute première importance pour la stabilité des barrages de stériles.

Le dispositif de base pour le contrôle du niveau de la ligne de saturation est le tube piézométrique ouvert, à lecture manuelle. Il est auto-désaérant et plus fiable que de nombreux piézomètres du type « fermé ». Il réagit à la pression d'eau au niveau de sa prise filtrante, dont la longueur doit être inférieure à 2 mètres et qui est normalement située à l'extrémité inférieure du tube.

Les tubes piézométriques sont généralement installés au niveau du sol avant la mise en dépôt des stériles en vue de mesurer les pressions d'eau qui se développent à la base du dépôt. La surélévation du tube s'effectue au fur et à mesure de la montée du dépôt. Le support au niveau du sol empêche le tube de s'enfoncer beaucoup.

En raison de l'anisotropie des perméabilités résultant de la méthode de mise en dépôt, les lignes équipotentielles de l'écoulement sont relativement inclinées. De ce fait, la charge d'eau donnée par les tubes piézométriques, ayant leur extrémité inférieure au niveau du sol, indiquent une ligne de saturation plus basse que sa position réelle. Des valeurs plus précises peuvent être obtenues à partir de tubes piézométriques installés dans les stériles, ayant leurs prises filtrantes situées légèrement au-dessous de la position de la ligne de saturation indiquée par les tubes profonds. Les tubes piézométriques ayant leurs prises filtrantes à diverses profondeurs fournissent plus d'informations sur la forme du réseau d'écoulement. Des tubes piézométriques à prises multiples donneront des renseignements plus détaillés, mais leur installation dans des stériles sans cohésion est très difficile.

Les piézomètres qui n'atteignent pas la fondation s'enfoncent lentement dans les stériles, en particulier ceux implantés dans les zones internes de la plage ou au-dessus de la zone initiale de retenue. Le niveau de l'extrémité inférieure d'un tube est déterminé en mesurant périodiquement la cote de son sommet, la longueur du tube mis en place étant connue.

Après une montée suffisante du barrage de stériles, on peut installer des tubes piézométriques par forage depuis la crête des digues secondaires, depuis la zone sèche de la plage, ou depuis le talus aval.

Les tubes piézométriques présentant un diamètre intérieur de 50 à 60 mm – tels ceux généralement utilisés dans les barrages de stériles – ont un long temps

decrease the danger of liquefaction. The drainage augments the seepage discharge which is much greater than in earthfill dams. However, it is not dangerous if there are properly functioning filters and drains and if the seepage quantity is collected and turned back to the tailings pond or to the processing plant. Recommendations about the design of drainage are given by ICOLD Bulletin No. 97.

Tailings are very sensitive to internal and surface erosion and this emphasizes once again the importance of seepage monitoring.

2.3. PHREATIC SURFACE

The phreatic surface level is of prime importance for the tailings dams stability.

The basic device for measuring the phreatic level is the open standpipe piezometer, read manually. It is self de-airing and more reliable than many of the closed system piezometers. It responds to groundwater pressure around its intake filter, which should not be longer than 2m and is normally located at the bottom end of the standpipe.

Standpipes are usually installed on the ground before any tailings are placed, in order to measure the water pressures that develop at the base of the impoundment. Additional pipe is added as the level of the tailings rise. The ground support prevents them from sinking appreciable amounts.

Because of the anisotropic permeability associated with the method of deposition, the equipotential lines of the flow net that develop, are somewhat inclined. Because of this, the water head given by standpipes based on the ground, indicates a phreatic surface lower than the actual one. More accurate values can be obtained from standpipes installed in the tailings, with their intake filters placed a short distance below the position of the phreatic surface indicated by the deeper standpipes. More information about the shape of the flow net can be obtained from standpipes placed with their intake filters at intermediate depths. Multipoint standpipe piezometers would give even more detailed information, but their installation in cohesionless tailings is extremely difficult.

If the piezometers do not touch the foundation, they slowly sink into the tailings, especially those which are in the inner parts of the beach or which are over the initial location of the pond. The elevation of their bottom end is calculated by measuring periodically the elevation of their top and knowing the length of the pipes used.

After the tailings dam is raised to a significant height, standpipe piezometers can be installed by drilling from the crests of the secondary dikes, from the dry part of the beach, or from the downstream slope.

Standpipe piezometers with an inside diameter of 50 to 60 mm, as commonly used in tailings dams, have a long time lag (slow response). They may be suitable

de réponse. Ils peuvent convenir pour les zones externes des barrages de stériles construits par la méthode amont, où les stériles mis en dépôt sont grossiers et donc plus perméables, ou lorsque la surface de saturation change lentement. Dans certains cas, on adoptera des tubes de petit diamètre (20 à 30 mm), ou des piézomètres type Casagrande ayant un diamètre intérieur de 10 à 12 mm. De tels tubes de petit diamètre sont généralement placés à l'intérieur d'un tubage rigide de protection de plus grand diamètre. Lorsque les tubes piézométriques sont installés par forage depuis la plage, le tube plastique de 12 mm peut être fourni en rouleaux et, lors de sa fixation à la prise filtrante, il peut être installé dans le tube de protection du forage.

Les tubes piézométriques qui sont perméables sur toute leur hauteur, ou doivent être entourés de matériaux filtrants perméables sur toute leur hauteur, ne sont pas recommandés car ils créent une communication verticale entre les parties supérieure et inférieure des stériles, où les pressions interstitielles peuvent être très différentes. Si la pression d'eau augmente uniformément avec la profondeur, ils se comportent comme des puits d'observation, mais cette situation correspond seulement à un sol homogène avec des lignes équipotentiels verticales. Cette situation n'existe pas dans les barrages de stériles, présentant une hétérogénéité dans la direction verticale et une anisotropie. De ce fait, et aussi sous l'effet des drains, les lignes équipotentiels sont inclinées. Le puits d'observation n'indique donc pas la hauteur réelle de la ligne de saturation. Lorsqu'il y a une surpression interstitielle dans les zones inférieures, le puits décharge cette surpression, mais, en même temps, il y a surélévation du niveau mesuré de la ligne de saturation.

La position de la surface de saturation peut également être obtenue en adoptant des piézomètres du type « fermé » (cellule piézométrique). Afin de recueillir des résultats précis, plusieurs appareils seront utilisés, en les plaçant l'un au-dessus de l'autre sur une ligne verticale. Il est cependant préférable d'utiliser des tubes piézométriques simples, pour déterminer la position de la surface de saturation, si on peut assurer un accès périodique à ces appareils.

S'il existe des surpressions interstitielles dues à une consolidation incomplète, tous les piézomètres indiqueront alors un niveau piézométrique plus élevé que le niveau de la ligne de saturation. Dans ce cas, les piézomètres (tubes piézométriques et piézomètres du type « fermé ») les moins profonds et très proches de la ligne de saturation donneront des niveaux tendant à être plus élevés mais approchant les valeurs exactes.

Les niveaux piézométriques sont les plus élevés au moment du dépôt – ou peu de temps après – d'une couche supplémentaire de stériles; mais il n'est pas possible de marcher sur la plage humide pour mesurer le niveau d'eau dans un piézomètre, lorsque le déversement des stériles est en cours, de sorte qu'on manque le relevé de la position la plus élevée de la ligne de saturation. La même situation se présente pour les zones internes de la plage, où les tubes piézométriques ne sont pas accessibles. Une solution consiste à placer un piézomètre, avec télémètre, au fond du tube piézométrique, immédiatement au-dessous de sa prise filtrante, et à sortir son câble (ou le tuyau) à proximité de la partie filtrante perforée. Pour maintenir le piézomètre toujours submergé et pour empêcher l'entrée d'air, on laisse, au fond du tube piézométrique, une partie non perforée (constituant un petit réservoir). La lecture zéro du piézomètre avec télémètre correspondra au niveau d'eau, au fond du tube piézométrique, jusqu'au niveau de la prise filtrante; lorsque les lectures

for the outer zones of the upstream tailings dams where the deposited tailings are coarser and hence more permeable, or where the phreatic surface changes slowly. In other positions, pipes of smaller diameter such as 20 to 30 mm should be used, or Casagrande standpipe piezometers, with an inside diameter of 10 to 12 mm. Such pipes of small diameters are usually placed inside stiff protective casing pipes of larger diameter. When standpipe piezometers are installed by drilling from the beach, the 12 mm plastic tube can be supplied in rolls, and when attached to their intake filter unit, can be installed in the protecting drill pipe.

Standpipe that are permeable over their whole height, or are to be surrounded by pervious filter material over their whole height, are not recommended because they create a vertical connection between upper and lower parts of the tailings, where pore pressures may be very different. If the water pressure increases uniformly with depth, they behave as observation wells, but this condition applies only to homogeneous ground with vertical equipotential lines. In tailings dams, however, these conditions do not apply. They have well developed nonhomogeneity in the vertical direction and anisotropy. Because of this, and also because of the effect of the drains, the equipotential lines are inclined. Consequently the observation well does not indicate the true height of the phreatic surface. When there is a higher excess pore pressure in the lower parts, it relieves it but at the same time it increases the measured level of the phreatic surface.

The position of the phreatic surface can also be obtained with the use of closed piezometers. Several should be used, one above the other on a vertical line, for the most accurate results. It is preferable, however, to use the simple standpipe piezometers, for the determination of the position of the phreatic surface, if one can assure periodic access to them.

When there is excessive pore pressure, due to incomplete consolidation, then all piezometers will indicate a piezometric level that is higher than the phreatic surface. In these circumstances, the shallowest piezometers (standpipe or closed piezometers), which are closest to the phreatic surface, will show levels tending to be higher, but approaching the correct values.

Piezometric pressures are at their highest when, or just after, a further layer of tailings has been added, but because it is not possible to walk over the wet beach where spigotting is taking place to measure the water level in the piezometer, the highest position of the phreatic surface is missed. There is the same situation at the inner parts of the beach, where the standpipe piezometers are inaccessible. These problems can be overcome by placing a remote reading piezometer inside the standpipe piezometer at the bottom, immediately under its intake filter, and bringing its cable (or tubing) out adjacent to the perforated filter. To keep the piezometer always under water, to prevent ingress of air, an unperforated part (a small container) is left in the bottom of the standpipe. The zero reading of the remote reading piezometer will be the water level in the bottom of the standpipe, up to intake filter level, so that when readings fall to that value, no pore pressure will be acting on the filter. Electrical piezometers can be lowered to the bottoms of the

tombent à cette valeur, aucune pression interstitielle n'agira sur le filtre. Des piézomètres électriques peuvent être descendus au fond des grands tubes piézométriques pour obtenir les pointes de lectures, lorsque les sommets des tubes piézométriques sont inaccessibles.

Il est important d'installer des piézomètres à proximité des drains pour vérifier l'efficacité de ceux-ci.

Les tubes piézométriques adoptés pour les barrages de stériles sont généralement constitués de tuyaux PVC de forte épaisseur. Les tuyaux risquent de s'incliner ou même de se rompre dans les zones internes des barrages de stériles par suite du fluage de la masse de boues. A ces endroits et en général dans les barrages de stériles de grande hauteur, il convient d'adopter des tubes piézométriques constitués d'un matériau plus résistant, par exemple des tubes plastiques renforcés de fibres de verre. Les tubes et les jonctions doivent résister aux pressions élevées et aux attaques chimiques. Les tubes en acier se corrodent rapidement sous l'action des sulfates ou des matériaux oxydants, et seront galvanisés. Les tuyaux en aluminium ne seront pas utilisés en milieu alcalin.

Les tubes piézométriques non métalliques peuvent également être utilisés comme dispositif de mesure des tassements internes. Des plaques de tassement, en métal non corrosif, sont placées autour des tubes, à des intervalles égaux, leur position étant détectée par une sonde magnétique descendue dans les tubes au moyen d'un câble gradué pour les mesures de distance.

2.4. PRESSION INTERSTITIELLE

2.4.1. Mesures de pression interstitielle

Lorsque la consolidation n'est pas encore achevée, la pression interstitielle comprend non seulement la pression d'eau due à la différence de charge entre les niveaux d'eau amont et aval, mais aussi la surpression interstitielle engendrée au cours d'un chargement non drainé. Elle peut être élevée dans les zones internes d'un barrage de stériles. La pression interstitielle est d'une importance cruciale pour la sécurité des barrages de stériles de grande hauteur et doit être impérativement mesurée. La comparaison du coefficient de pression interstitielle r_u (pression interstitielle mesurée divisée par la pression totale des matériaux sus-jacents) avec la valeur maximale de r_u retenue au projet représente un point important dans la vérification des hypothèses de projet.

La pression interstitielle peut être mesurée au moyen de tubes piézométriques, si celle-ci n'est pas trop forte, c'est-à-dire si le niveau d'eau n'atteint pas le sommet du tube et ne déverse pas. Dans les zones internes des barrages de stériles, la pression interstitielle peut être si élevée que le niveau piézométrique dépasse le sommet des tubes, et la hauteur jusque laquelle un tube peut être surélevé et mesuré encore manuellement a une limite pratique. Dans ce cas, un manomètre Bourdon peut être fixé au sommet du tube piézométrique comme dispositif provisoire de mesure; ou bien, le tube piézométrique peut être transformé en un piézomètre à double tube, avec télémesure, en y raccordant des tubes (méthode décrite par Penman, 1982). Si de fortes pressions sont prévues, le piézomètre peut être

larger standpipes, to obtain these peak readings, while the tops of the standpipes are inaccessible.

It is important to put piezometers in the vicinity of the drains to check the effectiveness of the drains.

The standpipe piezometers in tailings dams are usually made with thick-walled PVC pipes. There is a danger of the pipes becoming inclined or even breaking in the internal zones of the tailings dam due to creep of the slimes mass. At these places, and in high tailings dams generally, it is as well to make the standpipe piezometers of stronger material, such as fiber-glass reinforced plastic pipes. The pipes and the splices are to be tight to withstand the high pressure and also chemically resistant. Steel pipes rapidly corrode in sulphate or oxidizing tailings medium and should be zinc-coated. Aluminum pipes should not be used if the tailings medium is alkaline.

Standpipe piezometers of non-metal pipes can also be used as internal settlement gauges. Settlement plates of non-corrosive metal can be placed around the tubes, spaced at almost equal vertical intervals, and detected by a magnetic sensing unit lowered into the standpipes on a cable calibrated as a measuring tape.

2.4. PORE PRESSURE

2.4.1. Pore pressure measurements

Pore pressure, when consolidation is not complete, includes not only the hydrodynamic pore pressure, due to the head difference between the upstream and downstream water levels, but also the excess pore pressure component, generated during undrained loading. It can be very high in the internal parts of a tailings dam. It is of crucial importance for the safety of high tailings dams and it is imperative that it be measured. The comparison of the pore pressure coefficient, r_u (measured porewater pressure divided by total overburden pressure), with the maximum design value of r_u , is an important check on the design assumptions.

Pore pressure can be measured by standpipe piezometers if it is not so high that the water level rises to the top of the standpipe and overflows. In the inner part of the tailings dams the pore pressure could be so high, that the piezometric level exceeds the top of the standpipes, and there is a practical limit to the height that a standpipe can be raised and still read manually. In such a case, a Bourdon tube pressure gauge can be attached to the top of the standpipe as a temporary measure, or the standpipe piezometer can be converted to a two tube remote reading piezometer by connecting tubes to it (a method described by Penman 1982). If high pressures are predicted, the piezometer can be made with an electrical transducer in, or just below, the intake filter, sealing the connecting cable

constitué d'un appareil électrique situé dans la prise filtrante – ou juste au-dessous –, la traversée du câble de raccordement étant rendue étanche au moyen d'une bague spéciale. Il devient alors un piézomètre, avec télémesure, qui peut être vérifié en mesurant le niveau d'eau dans le tube piézométrique jusqu'à ce que la pression mesurée devienne trop élevée, lorsque le sommet du tube est muni d'un capot.

Le meilleur moyen de mesurer la surpression interstitielle résultant d'une consolidation incomplète est de faire appel à des piézomètres avec télémesure. Il y a quatre types principaux de piézomètres : hydraulique, pneumatique, à corde vibrante, à résistance électrique. Ils ont été décrits par Dunncliff (1988), Hanna (1985) et l'USBR (1987), ainsi que dans d'autres documents.

Il importe de choisir le type de piézomètre s'adaptant le mieux aux conditions particulières de chaque barrage de stériles.

Les piézomètres hydrauliques et pneumatiques peuvent nécessiter un entretien difficile, sur une longue période, et ne peuvent convenir à la mesure des pressions interstitielles induites par les secousses sismiques. Les piézomètres hydrauliques sont assujettis à des contraintes de différence de niveau par rapport au local de mesures, des aspirations trop importantes dans la tuyauterie de liaison devant être évitées; les piézomètres pneumatiques ont des contraintes de longueur concernant leurs tubes de liaison. Cependant, ces deux types ne sont pas influencés par la foudre, ce qui présente un avantage sur les cellules électriques.

Les lectures des piézomètres du type à résistance électrique sont sensibles aux perturbations électriques.

En raison de la grande longueur des câbles de raccordement, pouvant dépasser 1 000 m dans les grands barrages de stériles, les piézomètres basés sur le principe électrique seront utilisés. Le piézomètre à corde vibrante convient le mieux car il n'est pas affecté par des perturbations électriques autres que la surtension due à la foudre, contre laquelle il doit être protégé. Ce type de piézomètre est précis, de lecture simple et rapide, avec possibilité d'enregistrement automatique; son installation est facile. Compte tenu de sa réaction rapide, il peut indiquer la pression interstitielle sous chargement dynamique. Les stériles pouvant être chimiquement actifs et la plupart des câbles étant situés sous la surface de saturation, des précautions spéciales doivent être prises pour assurer la résistance du piézomètre et du câble associé vis-à-vis de l'attaque chimique. Les barrages de stériles nécessitent des piézomètres, de structure stable et résistante, pouvant convenir à tout milieu et fonctionner de façon fiable sur plus de 25 ans. Cela est essentiel compte tenu de la longue période d'exploitation des barrages de stériles. Le choix de piézomètres présentant une grande pérennité est d'une importance capitale.

2.4.2. Étalonnage *in situ* des piézomètres

Compte tenu de la longue période d'exploitation, les piézomètres pneumatiques et électriques nécessitent un contrôle et un réétalonnage périodiques. Les piézomètres à corde vibrante sont livrés avec un dispositif permettant leur étalonnage *in situ*. Ce dispositif a été mis au point par DiBiagio (1974), et il est maintenant fourni sous diverses formes par de nombreux fabricants. Deux tubes pneumatiques sont associés au câble électrique de liaison, et le diaphragme en métal

through a side connection with a special gland. It then becomes a remote reading piezometer that can be checked and read by the water level in the standpipe until the measured pressure becomes too high, when the standpipe is capped.

The best way to measure the excess pore pressure component, due to incomplete consolidation, is by remote reading piezometers. There are four basic types: hydraulic; pneumatic; vibrating wire; and electrical resistance. They have been described by Dunnycliff (1988), Hanna (1985) and USBR (1987), as well as elsewhere.

It is important to choose the most appropriate type of piezometer for the individual conditions of each tailings dam.

Hydraulic and pneumatic piezometers can require difficult long term maintenance, and are not suitable for the measurement of dynamic pore pressures during earthquake shock. Hydraulic piezometers cannot be used to measure piezometric levels more than about 7m below them, to avoid excessive suctions developing in the connecting tubing, and pneumatic piezometers have restrictions on the permissible length of their connecting tubes. However, both are not influenced by lightning, which is their advantage over the electrical types.

The readings of electric resistance type piezometers are sensitive to electric disturbance.

Because the cable length in large tailings dams can reach and exceeds 1 000 m, piezometers based on the electrical principle should be used. The most suitable types are piezometers based on the frequency principle using vibrating wires, which are not affected by electrical disturbances other than voltage overloading from lightning, against which they must be protected. They are precise, reading can be made rapidly and simply, automatically recorded, and they are easily installed. They can also read the dynamic pore pressure since they react quickly. Since the tailings may be chemically active, and the cables are mostly below the phreatic surface, special precautions should be taken to ensure that the cable and attached piezometer will be resistant to chemical attack. Tailings dams require piezometers that are stable and resistant, which can withstand any tailings liquor, are durable and perform reliably for more than 25 years. This is essential for the long operation period of tailings dams. The selection of durable piezometers is of paramount importance.

2.4.2. On-site calibration of the piezometers

Bearing in mind the long period of operation, pneumatic and electrical piezometers require periodical checking and recalibration. Piezometers with vibrating wire sensors are available with provision for in situ calibration. DiBiagio (1974) developed this arrangement and it is now produced in various forms by many manufacturers. Two pneumatic tubes are incorporated in the connecting electric cable and the stainless metal diaphragm, to which the vibrating wire is attached, is

inoxydable, auquel est fixée la corde vibrante, est perforé et recouvert d'un mince diaphragme en plastique. Dans des conditions normales d'exploitation, la pression interstitielle applique le diaphragme en plastique contre le diaphragme métallique, dont la flexion variable suivant la pression appliquée est mesurée par la corde vibrante. La lecture « zéro » peut être vérifiée en augmentant la pression de gaz à l'intérieur du corps du piézomètre jusqu'à ce que cette pression dépasse légèrement la pression interstitielle, le diaphragme en plastique se décollant du diaphragme métallique, ce qui donne la condition « zéro ». On peut réétalonner *in situ* les piézomètres en augmentant la pression de gaz par paliers, jusqu'à la valeur de la pression interstitielle, ce qui fournit des lectures de pressions dans tout le domaine généralement mesuré. Un gaz inerte, tel que l'azote sec, est utilisé, à la fois pour les variations de pression et pour la circulation à travers les deux tubes afin de s'assurer que l'intérieur du corps de l'appareil est rempli de gaz inerte, permettant ainsi de maintenir les éléments intervenant dans le fonctionnement à l'état sec et exempts d'oxydation. L'azote sec peut être obtenu à des pressions relativement élevées dans des cylindres lourds munis de détendeurs réglables assurant une fourniture de gaz aux pressions souhaitées. Un dispositif simple contenant une jauge de pression est utilisé pour le réétalonnage du piézomètre. On fabrique maintenant des piézomètres combinés, comportant deux capteurs différents. Un capteur pneumatique associé au capteur à corde vibrante permet une seconde évaluation des pressions et un réétalonnage de ce dernier dispositif.

Lorsque des piézomètres avec télémesure sont situés à la base des tubes piézométriques, ils peuvent être contrôlés facilement et avec précision en relevant les niveaux d'eau dans les tubes.

2.4.3. Détermination du niveau des piézomètres

Les stériles mis en dépôt étant peu consistants, ils ont une faible densité et leurs déformations verticales sont importantes, principalement dans les zones de boues. Les piézomètres situés dans les stériles suivent ces déformations verticales. Afin de s'assurer que les piézomètres tassent solidairement avec les stériles et ne s'y enfoncent pas, ils sont installés sur de larges plates-formes en bois. Il est toujours nécessaire de connaître les niveaux des piézomètres et, dans ce but, on peut utiliser les procédés suivants :

1) Des dispositifs de niveaux hydrauliques sont installés près des cellules de pression interstitielle sur une plate-forme commune en bois ou en matériau sans activité chimique, ayant une masse volumique égale à celle des stériles humides.

2) On dispose maintenant d'une combinaison d'appareils mesurant à la fois : la pression interstitielle (appareil à corde vibrante) et la position verticale (dispositif de niveaux hydrauliques). Ils sont munis de câbles électriques contenant des tuyaux pour l'eau des niveaux.

3) Les piézomètres sont situés près des tubes piézométriques profonds équipés de plaques pour la mesure des tassements différentiels. La position verticale des piézomètres est déterminée à partir des mesures de tassements.

perforated and covered by a thin plastic diaphragm. Under normal operating conditions, the pore water pressure presses the thin plastic diaphragm against the metal diaphragm, which deflects according to the applied pressure, a deflection measured by the vibrating wire. The zero reading can be checked by increasing the gas pressure inside the body of the piezometer until it slightly exceeds the pore water pressure, when the plastic diaphragm is pushed away from the metal diaphragm, leaving it in the zero condition. The piezometers can be recalibrated in situ by increasing the internal gas pressure in stages, up to the value of the pore water pressure, so giving readings of pressures over the full range being currently measured. An inert gas such as dry nitrogen, is used, both for pressure changes and to circulate through the two tubes to ensure that the internal body of the instrument is full of the inert gas to keep the operating parts dry and free from oxidation. Dry nitrogen can be obtained at fairly high pressure in heavy cylinders that are fitted with reducing valves adjustable so that the gas can be taken at required pressures. A simple apparatus containing a test pressure gauge is used for the re-calibration of the piezometer. Combined piezometers are also now produced, consisting of two different transducers. A pneumatic transducer packaged in tandem with the vibrating wire transducer permits a second evaluation of the measured pressures and recalibration of the latter.

When remote reading piezometers are placed in the bottom of standpipe piezometers, they can easily and accurately checked by the readings of water levels in the standpipes.

2.4.3. Estimation of piezometers level

Because the tailings are deposited loosely they have low density, and their vertical deformations can be considerable, particularly in the slimes zone. Piezometers located in the tailings follow this vertical deformation, and in order to ensure that the piezometers settle together with the tailings and do not sink in them, they are placed on wide wooden platforms. It is always necessary to know the current elevation of the piezometers, and this can be done in the following ways :

1. Fluid levelling devices are placed next to the pore pressure gauges on a common wooden platform or platform of chemically inactive material, with unit weight equal to the unit weight of the wet tailings.
2. Combined gauges are now available that will record both the pore pressure on a frequency principle and the vertical position with an hydraulic levelling device. They have electric cables containing tubes for the liquid of the levelling apparatus.
3. The piezometers in the tailings are located near deeper standpipes that have plates fitted for measuring differential settlements. The vertical positions of the piezometers are evaluated from the settlement readings.

2.4.4. Câbles

On doit porter une attention particulière aux câbles des appareils électriques noyés dans les barrages de stériles [Dunnicliff (1978), Hanna (1985) et USBR (1987)]. Ils doivent comporter des conducteurs résistants, en cuivre pur recuit, chaque fil étant isolé par une gaine en polyéthylène haute densité. En raison des tassements importants des stériles, ces câbles doivent avoir une grande résistance à la traction. Ils sont munis d'un blindage constitué de fils d'acier galvanisé, le blindage servant également de protection électrique. Une autre solution consiste à rendre les câbles extensibles en enroulant en spirale les conducteurs en cuivre à l'intérieur de la gaine. Les enveloppes et les tuyaux en plastique peuvent supporter un allongement important sans rupture.

Du fait du milieu saturé ou même humide entourant les câbles, ceux-ci seront rendus parfaitement étanches au moyen d'une double gaine interne et externe en polyéthylène haute densité, d'épaisseur suffisante.

Le câble sera obturé au moyen de graisse minérale pour empêcher l'écoulement de l'eau le long des conducteurs en cas de détérioration.

La gaine externe appliquée sur l'enveloppe métallique assurera une protection résistante, flexible et durable, capable de résister à la lumière solaire et aux contraintes et chocs possibles.

Les signaux électriques provenant des piézomètres devront, dans toute la mesure du possible, être exempts de parasites. Dans ce but, les conducteurs protégés individuellement seront torsadés et empaquetés à l'intérieur d'une gaine globale.

Des câbles standard de ce type existent sur le marché. Le projecteur choisira le câble s'adaptant le mieux aux conditions de chaque barrage de stériles.

Les épissures des câbles sont des points fragiles et devront être évitées autant que faire se peut. On les écartera lors de l'établissement du projet d'auscultation et on ne les adoptera que pour des réparations.

La longueur de câble de chaque appareil de mesure comportera un certain pourcentage de mou, dépendant des tassements prévus dans les stériles. Par rapport aux câbles situés sur le sol ou dans les barrages en terre, ce mou est beaucoup plus grand pour les câbles enterrés dans les barrages de stériles.

2.4.5. Protection des appareils de mesure contre la foudre et la surtension

La protection des appareils d'auscultation contre la foudre est beaucoup plus difficile à assurer dans les barrages de stériles que dans les barrages en terre pour les raisons suivantes :

- les appareils de mesure et les câbles sont noyés dans des dépôts de stériles humides;
- la plus grande partie de la surface du barrage de stériles est plus ou moins imbibée d'eau;
- les appareils de mesure sont répartis sur une grande zone;
- le barrage de stériles continue de monter.

2.4.4. Cables

Particular attention must be drawn to the cables of electrical instruments embedded in the tailings dams [Dunncliff (1988), Hanna (1985) and USBR (1987)]. Cables of solid round wire of commercially pure annealed copper, each core being insulated by insulating-grade high-density polyethylene, are to be used. Because of the great settlements in the tailings, these cables must be strong with a high tensile strength. They are heavily armoured with galvanized steel wires, the armouring also serving as electrical shielding. As an alternative approach, the cables can be made able to stretch, by having the copper conductors wound spirally within the sheathing. The plastic coatings and plastic tubes are capable of considerable extension without failure.

Because of the wet, or at least humid environment surrounding the cables, they must be faultlessly water-tight with internal armouring and external sheathing of the same high-density polyethylene of sufficient thickness.

The cable must be water-blocked with petroleum jelly to prevent migration of water along the conductors in case of damage.

The outer jacket, applied over the metallic shield, shall provide a tough, flexible and durable protective covering, able to withstand exposure to sunlight and expected stresses and shocks.

The electrical signals from the piezometers should be as free as possible from electrical noise. To avoid noise, the individually shielded conductors of the cables must be twisted and bundled inside an overall shield.

There are standard cables of these kinds in stock. The designer must select among them the cable most appropriate for the conditions in his particular tailings dam.

Cable splices are points of risk and should be avoided as much as possible. They should be avoided in the original instrumentation design and only used for repair of accidental damage.

Cable length for each sensor must be chosen with a certain percentage allowed for slack, depending on the expected settlements in the tailings. Such redundancy in length of cables buried in the tailings is much greater than for cables laid on the ground and for cables in earthfill dams.

2.4.5. Lightning and overvoltage protection of the instrumentation

Lightning protection of the monitoring system in a tailings dam is much more difficult than in the case of earthfill dams for the following reasons :

- the devices and the cables are buried in the wet deposited tailings;
- most of the tailings dam surface is wet or moist;
- the devices are distributed over a wide area;
- the tailings dam rises continuously in height.

Il est donc difficile de mettre en place des circuits de protection, alors que ceux-ci sont plus efficaces lorsqu'ils sont conçus individuellement pour chaque groupe d'appareils et de câbles.

Dans le cas de piézomètres à corde vibrante, DiBiagio et Myrvoll (1985) recommandent la protection haute tension suivante :

- les piézomètres peuvent être isolés en utilisant des transformateurs à l'intérieur du corps de l'appareil de mesure sur la ligne d'entrée, des lampes diodes étant couplées à des cellules sensibles à la lumière sur la ligne de sortie;

- utilisation d'une batterie d'alimentation en énergie pour protéger tout le dispositif contre les variations de tension causées par la foudre et les surcharges;

- protection contre les surtensions dans les capteurs à corde vibrante et au tableau des appareils dans la salle de contrôle;

- gaine de protection du câble mise à la terre à ses deux extrémités - à l'une des extrémités, elle est reliée au chemisage du dispositif de mesure; à l'autre extrémité, dans la salle de contrôle, elle est mise à la terre séparément de la source d'énergie des dispositifs électroniques des appareils d'enregistrement;

- transformateurs d'isolement, varistors et tubes électroniques sur la source principale d'énergie;

- mise à la terre satisfaisante de la salle de contrôle;

- circuits de protection du dispositif d'enregistrement.

Pour les barrages de stériles de faible hauteur, où les pressions interstitielles sont faibles et les mesures sous chargement dynamique ne sont pas nécessaires, les piézomètres du type hydraulique ou pneumatique peuvent être utilisés. Ils ne nécessitent pas de câbles et ne sont pas affectés par la foudre. Des tubes piézométriques métalliques conviennent également.

Pour les barrages de stériles de grande hauteur, où les mesures des pressions interstitielles sous chargements statique et dynamique sont nécessaires, les piézomètres à corde vibrante seront adoptés. Ici, la protection contre la foudre revêt une grande importance et aucun tube piézométrique métallique ne sera utilisé.

2.5. SÉISMICITÉ

Les grands barrages de stériles et particulièrement ceux situés dans les régions sismiques nécessitent des mesures sismiques. On peut faire appel à des « accélérographes pour fortes secousses » enregistrant les séismes au-dessus d'un seuil donné, en général 0,01 g, que l'on peut modifier à volonté. On utilisera, au minimum, deux ou trois accélérographes. Un accélérographe - le « principal » ou le « maître » - est situé sur le rocher de fondation et enregistre le séisme. Il envoie des signaux à l'ordinateur qui contrôle les autres appareils installés dans des excavations peu profondes en deux endroits différents dans la partie supérieure du talus aval. Ils sont périodiquement déplacés en cours d'exploitation de façon à être toujours au haut du talus; à la fin de l'exploitation du barrage, ils sont transférés sur la plage des stériles. Ils sont destinés à déterminer les propriétés d'amortissement des stériles et la réponse dynamique, nécessaires à l'étalonnage du modèle numérique sismique et au calcul de la réponse sismique du barrage de stériles.

The devices and cables in the moist, continuously rising tailings dam can hardly be protected by protective circuits, which are more effective if planned individually for each group of devices and cables.

When using vibrating-wire piezometers, the following high-voltage protection arrangements have been recommended by DiBiagio and Myrvoll (1985).

- the piezometers can be isolated by use of transformers within the gauge body on the input line, and light emitting diodes (LED) coupled to light sensitive cells on the output line;

- battery-powered system should be used to protect all the equipment from voltage fluctuations caused by lightning and power surges;

- transient absorbers in the vibrating wire sensors and at the panel in the control room;

- cable shield grounded at both ends – it is connected at one end to the casing of the device and at the other end in the control room it is grounded independently of the power supply of the electronics in the recording instruments;

- isolating transformers, varistors and gas-discharge tubes on main power supply;

- reliable earthing of the control room;

- protective circuits of the recording system.

For low tailings dams, where pore pressures are low and dynamic pore pressure measurements are not necessary, hydraulic or pneumatic type piezometers can be used. They do not need cables and remain unaffected by lightning strikes. In such cases, metallic standpipe piezometers can also be used.

For high tailings dams, where the measurement of both static and dynamic pore pressures is required, vibrating wire piezometers should be used. In such cases, lightning protection is of great importance and no metallic standpipe piezometers should be used.

2.5. SEISMICITY

Large tailings dams and particularly those located in seismic regions, require measurements to be made of seismic phenomena. This can be done with the so-called “strong motion accelerographs” to register the stronger earthquakes, above a certain given threshold, which can be varied at will, and is usually 0.01 g. As a minimum, two or three accelerographs should be used. One accelerograph – the “main” or the “master” – is placed on bedrock, to first register the earthquake. It sends signals to a computer that controls the others, that are placed in shallow excavations at two different places in the upper part of the downstream slope. They are periodically moved during operation so as to be in the upper part of the slope, and after the tailings dam ceases to operate, they are placed on the beach in the tailings. They are used for determining the tailings damping properties, and dynamic response, required for calibrating the seismic numerical model and calculating the earthquake response of the tailings dam.

2.6. PRESSION INTERSTITIELLE SOUS CHARGEMENT DYNAMIQUE ET LIQUÉFACTION

Il y a risque de liquéfaction des sables fins et silteux dans un barrage de stériles, lors d'un séisme. Celui-ci génère une pression interstitielle dans les stériles. La liquéfaction survient lorsque la pression interstitielle est suffisante pour commencer à disloquer la structure du sable lâche en réduisant les contraintes effectives à zéro.

La pression interstitielle sous chargement dynamique est mesurée et enregistrée pendant et après le séisme. Cette mesure peut être effectuée au moyen de piézomètres à corde vibrante, en raison de leur réponse rapide. Lorsque le séisme dépasse un seuil donné, l'accélérographe envoie un signal à l'ordinateur pour effectuer des lectures plus fréquentes sur tous les piézomètres. Lorsque les pressions interstitielles commencent à se dissiper, les mesures deviennent moins fréquentes et prennent fin au-dessous d'un certain seuil inférieur. Postérieurement, les appareils continuent à enregistrer les pressions interstitielles comme avant, c'est-à-dire toutes les semaines ou deux semaines. Dans les zones externes des barrages de stériles, la pression interstitielle maximale est rapidement atteinte (en quelques minutes) et se dissipe vite, alors que, dans les zones internes, cette variation est beaucoup plus lente (jusqu'à plusieurs jours).

Pendant toute l'exploitation du barrage, au cours de la montée lente de l'ouvrage, les mesures de pression interstitielle sont effectuées sous tous les séismes, y compris ceux de faible intensité. Elles permettent d'estimer la stabilité dynamique du barrage de stériles pour sa hauteur définitive et sous l'effet du séisme de projet. Si nécessaire, des mesures supplémentaires seront prises, telles que :

1) Drainage, en vue d'accélérer la consolidation et d'abaisser la ligne de saturation. Il n'y a pas de liquéfaction des stériles secs. Le drainage accélère la dissipation des pressions interstitielles et réduit le risque de liquéfaction sous séisme.

2) Compactage. Des sables compacts se liquéfient moins facilement, et lorsque leur densité relative dépasse 0,65 ils ne se liquéfient pas du tout. Le compactage peut se faire mécaniquement par vibro-compactage, ou dans des cas spéciaux par explosion contrôlée.

3) Chargement. Les stériles chargés ne se liquéfient que sous l'effet de fortes secousses dynamiques. L'abaissement de la ligne de saturation permet à la partie de remblai située au-dessus de charger la zone saturée sous-jacente et de réduire le risque de liquéfaction. Il est recommandé de mettre en place des couches drainantes intermédiaires (Bulletin n° 97), ce qui abaisse la ligne de saturation, la partie drainée supérieure chargeant la zone sous-jacente.

2.7. DÉPLACEMENTS VERTICAUX

Les dépôts de stériles sont le siège de déplacements verticaux importants, résultant de leur compactage sous leur poids propre et de leur consolidation. Les

2.6. DYNAMIC PORE PRESSURE AND LIQUEFACTION

There is a danger of liquefaction of the fine and the silty sand in the tailings dam as a result of earthquake. Dynamic pore pressure develops in the tailings and liquefaction occurs when the induced pore pressures become so high, that it begins to destroy the structure of the loose sand by reducing the effective stresses to zero.

The dynamic pore pressure is measured and recorded at the same time as the earthquake and afterwards when the peak values may be reached. The measurement of the dynamic pore pressures can be made with vibrating wire piezometers because they have a sufficiently rapid response. When the earthquake is above a given predetermined threshold, the accelerograph triggers the computer to take more frequent readings consecutively from all the piezometers. When the pore pressures begin to dissipate, the measurements become less frequent and are finally discontinued when they have decayed to a given low value. After that, the piezometers continue to register the pore pressures as before, once in about 1 to 2 weeks. In the outer zones of the tailings dam, the maximum dynamic pore pressure develops more rapidly (in several minutes) and is rapidly dissipated, while in the internal zones this occurs much more slowly (up to several days).

The dynamic pore pressure measurements are carried out for all earthquakes, including weak ones, during the entire operational period, as the dam is slowly raised. On the basis of this data, the dynamic stability of the tailings dam at its final height and for the design earthquake can be predicted. If required, additional structural measures can be taken, such as :

1. Drainage, designed to accelerate consolidation and lower the phreatic surface. Dry tailings do not liquefy. Drainage also accelerates the decay of the dynamic pore pressures and reduces the danger of liquefaction due to dynamic impact.
2. Compaction. Denser sand liquefies less easily, and when the relative density is more than 0.65 it does not liquefy at all. Compaction can be carried out mechanically by vibrocompaction, or in special cases by controlled blasting.
3. Loading. A stronger dynamic impact is required to liquify loaded tailings. With the lowering of the phreatic surface, those parts which lie above it load the wet parts underneath and reduce the danger of liquefaction. The use of intermediate draining layers, which are recommended (Bulletin No.97), lowers the phreatic surface, allowing the drained part above them to load the layers underneath.

2.7. VERTICAL MOVEMENTS

The vertical movements in tailings deposits are large and are due to compaction from its own weight and to consolidation. The external movements are measu-

déplacements en surface sont mesurés à partir d'un réseau d'observation topographique, dont les points de référence seront suffisamment éloignés du barrage pour les soustraire à l'effet du poids de l'ouvrage, le réseau de repères topographiques à ausculter étant situé :

- le long de la crête du remblai d'amorce et sur ses risbermes s'il est de grande hauteur;
- sur les risbermes du talus aval du barrage de stériles;
- le long de la crête du barrage terminé;
- sur la plage du barrage terminé;

Une augmentation brusque des déplacements verticaux peut être un signe d'érosion interne des stériles et de risque de rupture.

2.8. DÉPLACEMENTS HORIZONTAUX

Dans les barrages de stériles, les déplacements horizontaux sont essentiellement dus aux tassements non uniformes des diverses zones et beaucoup moins à la charge de l'eau retenue. Ils sont généralement mesurés aux mêmes points topographiques que ceux utilisés pour le relevé des déplacements verticaux.

Des mesures plus précises peuvent être exécutées lorsque les points sont situés sur une seule ligne droite, les déplacements étant déterminés par rapport à cette ligne (méthode des alignements). Si la crête et les risbermes du barrage ne sont pas rectilignes, la méthode trigonométrique (triangulation) moins précise est adoptée. Des méthodes plus précises sont : la méthode optique de collimation, les appareils sophistiqués à laser. Toutefois, sur les barrages de stériles, des méthodes de mesure très précises ne sont pas indispensables, sauf pour la crête des remblais d'amorce. Une étude approfondie de prises successives de photographies aériennes stéréoscopiques peut déceler des déplacements horizontaux et être particulièrement utile pour le contrôle d'un long barrage. Cependant, lorsque des mouvements dangereux sont observés, des mesures plus précises sont nécessaires. Pour cette raison, on devra toujours veiller à ce que de telles mesures précises puissent être mises en œuvre.

Des inclinomètres permettent de détecter les déplacements horizontaux de points situés à l'intérieur du remblai. Les déplacements horizontaux d'une fondation déformable peuvent être mesurés au moyen d'inclinomètres, mais aussi de pendules inversés. Ces appareils précis et coûteux ne sont à utiliser que si c'est absolument nécessaire, et principalement pour le remblai d'amorce s'il est de grande hauteur. Dans les zones constituées de stériles, on peut s'en passer car les tassements et déplacements horizontaux de ces zones sont beaucoup plus grands que ceux des barrages en terre.

L'utilisation du GPS (Global Positioning System - Triangulation par satellites) est également justifiée pour les grands barrages de stériles.

Il est difficile de prévoir la limite dangereuse des déplacements verticaux et horizontaux des diverses zones constituées de stériles. Des déplacements importants peuvent être sans danger s'ils sont régulièrement répartis sur une grande zone et

red by means of a survey control network of geodetic datum points, sufficiently outside of the dam to avoid the influence of dam weight and with a network of geodetic monuments located :

- along the crest of the starter dam and on its berms if it is high;
- on the berms of the downstream slope of the tailings part of the dam;
- along the crest of the completed tailings dam;
- on the beach of the completed tailings dam.

Sudden increase in vertical movements could be a sign of internal erosion of the tailings and potential for collapse.

2.8. HORIZONTAL MOVEMENTS

In tailings dams the horizontal movements are due mainly to non-uniform settlement of the different parts and much less to pressure from retained water. They are usually measured at the same geodetic points that are used for surveying the vertical movements.

More exact measurements can be performed when the points are located in one straight line and the movements are measured in relation to it. If the dam crest and the berms are not in straight lines, less accurate trigonometric method can be used. More accurate methods in this case are the optical collimation or the sophisticated laser instruments. In the tailings dams, however, very exact methods are unnecessary except for the crest of the starter dams. Careful study of successive sets of stereoscopic aerial photographs can reveal horizontal movements that have occurred, and may be particularly useful for checking a long dam. However when dangerous movements are observed, more exact measurements are required. For this reason provision for exact measurements should always be available.

The horizontal displacements of points within the body of the embankment can be detected by means of inclinometers. The horizontal displacement of a deformable foundation can be measured with inclinometers, but also by means of an inverted pendulum. These accurate and expensive instruments should be used only when absolutely necessary and mainly for the starter dam, if it is high. In the tailings parts it is useless because the settlements and horizontal displacements of the tailings parts of the tailings dams are much greater than in an earth dam.

The use of the Global Positioning System is also justified for large tailings dams.

It is difficult to predict exactly the dangerous limit of the vertical and the horizontal movements for the various components of the tailings facilities. Great movements can be harmless if they are distributed over a large area and if their

s'ils s'atténuent dans le temps. Au contraire, de faibles déplacements peuvent être dangereux s'ils se concentrent en un endroit et s'ils s'amplifient dans le temps.

2.9. TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS DANS LE REMBLAI

Les tassements différentiels à l'intérieur du remblai sont détectés au moyen de dispositifs de mesure des tassements internes. Le dispositif convenant le mieux est constitué d'un tube PVC entouré de plaques ou d'anneaux en acier inoxydable, dont les variations de distance sont mesurées au moyen d'une sonde électromagnétique. Les plaques sont mises en place sur la surface des stériles au cours de leur montée et sont espacées suivant un certain intervalle (le plus souvent 5 m environ). Leur dimension transversale est généralement de 30 - 40 cm. Elles suivent le tassement des stériles, en glissant le long du tube.

Du fait des tassements importants des stériles, les tubes télescopiques adoptés pour les barrages en terre ne conviennent pas; en effet, les plaques de tassement peuvent se coincer au droit des emboîtements. Il est préférable d'utiliser des tubes à emboîtements bien ajustés, permettant aux plaques de tassement de se déplacer librement le long des tubes.

Les mesures de tassements internes donnent généralement les informations suivantes :

- 1) La compacité des stériles mis en dépôt et sa variation dans le temps, à différentes hauteurs du barrage.
- 2) Le tassement de la fondation.

Les mesures de tassements et de pressions interstitielles donnent des renseignements sur la consolidation des stériles à l'échelle réelle et fournissent des données *in situ*, complétant les essais de consolidation exécutés en laboratoire lors des études de projet. On peut ainsi déterminer le module de déformation et le coefficient de pression interstitielle r_u de chaque couche en fonction de la charge et du temps. Ces relations servent à mieux connaître l'état contraintes-déformations et la consolidation du barrage.

2.10. PRESSION TOTALE

La mesure de la pression totale a trois objectifs :

- 1) Obtenir la pression effective nécessaire au calcul de la stabilité du barrage de stériles. Cette pression effective est obtenue en soustrayant de la pression totale la pression interstitielle mesurée.
- 2) Connaître la pression des stériles sur les ouvrages, tels que tours ou coursiers de décantation, conduits sous remblai, etc..., en vue de vérifier les calculs de projet et la stabilité globale.
- 3) Connaître la pression totale dans les directions horizontale et verticale en vue d'obtenir le coefficient de pression latérale et également le coefficient de Poisson, que l'on peut considérer ici comme une fonction simple de la contrainte.

rate decrease with time. On the contrary, small movements can be dangerous if they are concentrated at one place or if their rate increase with time.

2.9. DIFFERENTIAL SETTLEMENTS IN THE EMBANKMENT

The differential settlements in the embankment body can be measured with internal vertical movement measuring devices. Most suitable are PVC standpipes with settlement plates or rings made of stainless steel fitted over the pipes and an electromagnetic probe, lowered in the standpipe, to measure the positions of the plates. The plates are placed on the surface of the rising tailings, and spaced at certain vertical intervals (most frequently about 5 m). They are commonly 30-40 cm across, and move together with the settling tailings, sliding over the pipe.

Since the tailings suffer large settlements, it is not appropriate to use telescopic pipes which are applied in earthfill dams, because the settlement plates may get stuck at the splicings. It is preferable to use tightly and smoothly spliced pipes to allow the plates to slide unhindered over the pipes.

Settlement devices are usually used to obtain the following information :

1. The compaction of the deposited tailings and its variation with time at different heights of the dam.
2. The settlement of the foundation.

The measurements of settlement and pore pressures give information about the consolidation of the tailings at full scale and provide in situ data, supplementing any laboratory consolidation tests that had been made to obtain information for design. One can determine from them the deformation modulus and pore pressure coefficient r_u for every layer, as a function of load and time. These functions are input data to give a more reliable calculation of the stress-strain state and consolidation of the dam.

2.10. TOTAL PRESSURE

The measurement of the total pressure is used for three purposes :

1. To obtain the effective pressure, which is required for calculating the stability of the tailings dam. This is given by the total pressure, after subtracting from it the measured pore pressure.
2. The tailings pressure on structures such as the decant towers or chutes, culverts etc, required in order to check design calculations and overall stability.
3. The total pressure in the horizontal and vertical directions to obtain the coefficient of lateral pressure and also Poisson's ratio, which can be assumed here as simply stress-dependent.

Les dispositifs de mesure des pressions totales sont constitués cellules hydrauliques, ou de diaphragmes, avec une surface de mesure de 0,06-0,09 m². L'idéal serait que les cellules de pression des terres aient les mêmes caractéristiques de compressibilité que l'élément de stériles qu'elles remplacent. Les cellules sont beaucoup plus rigides que les stériles mis en dépôt et, pour réduire l'incompatibilité, on les réalise aussi minces que possible; mais il y a risque de lectures par excès. La mise en place des cellules *in situ* est très délicate et il est difficile d'assurer un contact uniforme des stériles avec toute la surface active des appareils. Cependant, malgré le soin pris pour leur installation, leur orientation peut changer après leur mise en place, au fur et à mesure que des couches de stériles sont déposées au-dessus. DiBiagio et al. (1982) ont associé des inclinomètres, avec télémessure, aux cellules installées dans des barrages en terre afin de mesurer les variations d'orientation, mais ce procédé est complexe.

Les cellules de pression des terres donnent des mesures ponctuelles et reflètent l'état des contraintes dans une zone très réduite, dépendant de ses caractéristiques locales; elles indiquent l'hétérogénéité locale et ne sont pas représentatives d'une large zone. Un grand nombre d'appareils sont nécessaires pour améliorer la fiabilité des mesures. Pour toutes ces raisons, les mesures de pression totale seront rarement nécessaires ou souhaitables pour les barrages de stériles.

2.11. ÉCHANTILLONS ET ESSAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS EN LABORATOIRE

Les importantes hétérogénéités locales et la microstratification des stériles mis en dépôt conduisent à une forte dispersion des résultats déduits des essais en laboratoire sur échantillons. Aussi, un grand nombre d'échantillons intacts doivent-ils être prélevés en vue d'obtenir des résultats significatifs. De tels prélèvements sont très difficiles à effectuer dans les couches profondes du remblai et, sous la ligne de saturation, ils nécessitent un matériel spécial, les stériles étant des matériaux non cohérents.

Les essais en laboratoire sur des échantillons intacts sont également très difficiles à cause de la nature meuble et du manque de cohésion des stériles. Des échantillons remaniés, prélevés dans une large zone afin d'être représentatifs, peuvent être reconstitués aux densités et teneurs en eau *in situ*, et donner de meilleurs résultats.

2.12. DÉTERMINATION *IN SITU* DES PROPRIÉTÉS DE MÉCANIQUE DES SOLS

Les essais *in situ* sont plus représentatifs des conditions réelles des stériles que les essais en laboratoire sur des échantillons. Ils ne sont pas affectés par les erreurs inhérentes à la prise d'échantillons et aux essais en laboratoire, et ils mesurent les propriétés réelles *in situ*.

On peut utiliser des pénétromètres pour déterminer la densité et la résistance au cisaillement. Les essais de pénétration dynamique, tels que l'essai SPT (Standard

The devices for measuring the total pressure can be hydraulic cells, or have diaphragms with active faces of about 0.06 - 0.09 m² surface area. Ideally these earth pressure cells should have the same compressibility characteristics as the element of the tailings that they replace. The cells are much stiffer than the placed tailings, and to minimise the incompatibility they are made as thin as possible, but there is a danger that they will over-read. Placement of the cells in the field is very difficult and it is not easy to ensure a uniform contact of the tailings with the whole active surface of the cells. However carefully they are placed, their orientation can change after placement, as the successive layers of tailings spread over them. DiBiagio et al (1982) attached remote reading inclinometers to cells placed in embankment dams to measure the changes of orientation that occurred, but this is a complex procedure.

Earth pressure cells provide point measurements and reflect the state of stress in a very limited zone which depend on its local character. They indicate the local non-uniformity and are not representative for a larger area. A very large number of instruments would be required to improve the reliability of their indications. For all these reasons, total pressure measurements are seldom necessary or desirable for tailings dams.

2.11. SAMPLING AND SOIL MECHANICS LABORATORY TESTS

The considerable local non-uniformity and microstratification of the deposited tailings lead to significant scatter of the results obtained from the laboratory testing of tailings specimens. To obtain significant results, a great number of undisturbed samples would have to be taken. It is very difficult to take undisturbed samples deep in the embankment, and under the phreatic surface this requires very special equipment, as the tailings are non-cohesive.

Laboratory testing of undisturbed samples are also very difficult because of the loose nature and lack of cohesion of the tailings. Disturbed samples, taken from a large area in order to be representative, can be reconstituted to the field densities and water contents, and may give the best results that can be obtained from laboratory tests.

2.12. IN-SITU DETERMINATION OF SOIL MECHANICS PROPERTIES

Tests made in situ are likely to be more representative of the true condition of the tailings than laboratory tests on samples. They are not affected by sampling or laboratory testing procedures and measure actual in situ properties.

Penetrometers can be used for testing density and shear strength. Dynamic penetration tests such as the Standard Penetration Test (SPT) are not recommen-

Penetration Test - Essai de pénétration standard), ne sont pas recommandés pour les dépôts de stériles, car ils provoquent une liquéfaction locale et donnent donc des résultats erronés. Il y a des pénétromètres statiques qui sont enfoncés dans les stériles au moyen de vérins hydrauliques; ces appareils enregistrent également la pression interstitielle et permettent un traitement automatique des résultats. Afin de pouvoir enfoncer le pénétromètre depuis la plage dont la consistance est molle, on peut utiliser des supports en bois sous les machines de mise en place; on peut également construire une route et une plate-forme en installant un géotextile recouvert d'un tapis de sable et gravier.

Une fois la plate-forme de travail établie, d'autres dispositifs spéciaux peuvent être utilisés, tels que le pressiomètre et le perméamètre, et des échantillons peuvent être prélevés pour la mesure de la teneur en eau et de la granulométrie. La perméabilité peut également être mesurée *in situ* au moyen d'essais d'eau dans des trous de forage.

2.13. MÉTHODE DE MISE EN PLACE DES STÉRILES

En vue de mener à bonne fin la construction par la méthode amont, la mise en place des stériles doit être soigneusement contrôlée. Les matériaux grossiers sont utilisés pour la construction du barrage et, plus la densité pouvant être obtenue sera élevée, plus la résistance des stériles mis en place sera grande et plus la masse de stériles stockés dans un volume donné sera élevée : c'est une considération importante pour juger de l'efficacité de la méthode de mise en dépôt adoptée. L'optimisation de la technique de mise en dépôt des stériles est spécifique à chaque barrage de stériles et même à chaque étape de montée de l'ouvrage. Elle dépend des conditions topographiques, de la granulométrie des stériles provenant de l'usine de traitement, ainsi que de la densité de la boue. Il est très difficile de définir par avance la technologie convenant le mieux : celle-ci sera réexaminée et optimisée au cours des travaux (méthode de « conception chemin faisant »).

Les caractéristiques (granulométrie des stériles initiaux et densité de la boue) doivent être déterminées fréquemment du fait des changements intervenant habituellement au cours de la longue période de construction.

Les paramètres techniques à contrôler sont :

- largeur de la plage;
- débits à la sortie des buses de déversement;
- granulométrie des stériles et densité de la boue entre le premier et le dernier point de déversement sur la conduite principale d'alimentation.

La technique de mise en dépôt des stériles par voie hydraulique conduit à un zonage suivant la granulométrie et la densité sur la largeur de la plage (entre l'endroit de déversement et la retenue de décantation). Le zonage a une grande importance pour l'obtention d'un « prisme » résistant formant le barrage de stériles (dimensions et stabilité). En vue du contrôle de la granulométrie et de la densité des stériles mis en dépôt, on prélève des échantillons sur la longueur et la largeur de la plage. Une partie de ces échantillons sont également soumis à des essais en laboratoire concernant la résistance au cisaillement, la compressibilité et la consolidation. On peut aussi déduire de ces essais la relation entre résistance au cisaille-

ded for tailing deposits, because they causes local liquefaction and therefore gives incorrect results. There are cone penetrometers that can be pressed into the tailings by hydraulic jacks, which also register pore pressure and automatically process the results. In order to be able to press in the penetrometer from the beach, where the consistency is soft, timber pads can be used to support the placing machines or a road and a platform can be made of geotextile covered with a sand-gravel cushion.

Once a working platform has been established, other specialist equipment can be used, such as the self boring pressuremeter and permeameter, and samples taken for the measurement of water content and grain size distribution. Permeability can also be measured in-situ with water recharge tests in boreholes.

2.13. TAILINGS PLACEMENT PROCEDURE

For successful construction by the upstream method, placement of the tailings must be carefully controlled. The coarsest material is needed for dam construction and the greater the density that can be achieved, the greater the strength of the placed tailings and the greater the weight of tailings stored in a given volume : a major consideration with regard to the efficiency of the whole disposal project. The optimization of the tailings deposition technique is specific for each tailings dam and even for the different stages as its height increases. It depends on the particular topographic conditions, on grain size distribution of the tailings as they arrive from the processing plant, as well as on slurry density. It is very difficult to specify in advance the most appropriate placement technology : it should be reviewed and optimized during the course of work; the “ design-as-you-go ” approach.

The output data (coarseness of the initial tailings and slurry density) has to be determined frequently because of the changes which usually develop during the long period of construction.

The technological parameters that need to be monitored are :

- beach width;
- discharges from the spigotting outlets;
- tailings coarseness and slurry density from the first and the last spigottings outlets from a main delivery pipe.

Hydraulic filling technology determines the zoning of the deposited tailings according to coarseness and density along the beach width (from the place of spigotting to the decanting pond). This is of significance in obtaining the required resistant prism that forms the tailings dam, with its designed dimensions and stability. Control is effected by taking samples for grain size distribution and density of the deposited tailings along and across the beach. Part of these samples are also subjected to shear strength, compressibility and consolidation laboratory tests. The relation between the shear strength, compressibility and consolidation and gradation and density can also be obtained from these tests. This relationship can enable

ment, compressibilité et consolidation, granulométrie et densité. Cette relation permet de déterminer facilement, par la suite, les propriétés mécaniques des stériles mis en dépôt.

Un des paramètres techniques les plus importants à contrôler est la largeur de la plage non submergée. Une plage suffisamment large est la condition préalable nécessaire à l'obtention d'un zonage satisfaisant des matériaux (granulométrie, densité et perméabilité), dont dépend la stabilité du barrage de stériles. La stabilité dépend aussi directement de la largeur de la plage, qui détermine la hauteur de la surface de saturation et la consolidation des stériles.

Un contrôle important est le suivi de la géométrie interne et de la configuration du barrage de stériles, en particulier de la largeur de la plage, au moyen de mesures topographiques précises et régulières au cours de la construction. Une photogrammétrie du barrage, utilisant des couples de photographies aériennes stéréoscopiques, permet d'obtenir des profils détaillés et une grande quantité d'informations, sans nécessiter d'importantes opérations sur le site. La photographie par satellites, pouvant être étudiée conjointement par le maître d'œuvre, le propriétaire de la mine et les organismes gouvernementaux de contrôle, est susceptible aussi de fournir une grande quantité de renseignements pour le contrôle de l'ouvrage. De telles méthodes seront mises en œuvre à intervalles réguliers, au moins une fois par an ou à des intervalles jugés adéquats pour le barrage particulier.

2.14. EXEMPLE

Le barrage de stériles de l'exploitation minière de cuivre d'Assarel, en Bulgarie, est donné comme exemple d'auscultation d'un barrage de stériles construit par la méthode amont (Fig. 1 et 2).

Le terrain naturel au pied aval est à la cote 639 m au-dessus du niveau de la mer. Le barrage de stériles comporte un remblai d'amorce de 85 m de hauteur se prolongeant vers l'amont par un tapis drainant de 250 m de largeur et de 18 m d'épaisseur à l'extrémité amont qui est fermée par une couche imperméable inclinée. Cette disposition (préconisée dans le Bulletin CIGB n° 97) a permis la formation d'une plage dès que les premiers stériles furent déversés par les buses (spigots) à partir du remblai d'amorce. Les stériles s'écoulaient sur le tapis, les éléments grossiers puis les éléments de plus en plus fins se déposant sur toute la largeur de 250 m, les boues se déversant sur la couche imperméable d'extrémité pour former le début de la retenue de stockage.

Le barrage de stériles a été conçu pour atteindre une hauteur de 190 m au-dessus du pied aval. Il est en exploitation depuis la fin de 1989; le 1^{er} septembre 1995, les matériaux mis en dépôt dépassaient de 9 m la crête du remblai d'amorce.

Des relevés de niveau piézométrique sont effectués sur des tubes piézométriques équipant 7 profils en travers. Dans chaque profil, il y a six tubes espacés de 60-80 m. Ils ont été installés avant le début du déversement des stériles et reposent sur le sol de fondation. D'autres tubes piézométriques moins profonds, destinés à déterminer l'inclinaison des lignes équipotentielles résultant de l'anisotropie, seront mis en place ultérieurement.

the mechanical properties of the deposited tailings to be readily determined afterwards.

One of the most important technological parameter to be monitored is the width of the non-submerged beach. A sufficiently wide beach is the prerequisite for favourable zoning of the material to give coarseness, density and permeability, on which the stability of the tailings dam depends. Stability also depends directly on beach width because it determines the height of the phreatic surface and the consolidation of the tailings.

One of the most important monitoring needs is to document the internal geometry and configuration of the tailings dam, especially its beach width, by accurate and regular surveys as construction progresses and height increases. Aerial topographic mapping of the tailings dams using pairs of stereoscopic photographs to produce detailed countours can provide a great deal of information, without the need of very much site surveying work. Satellite photography, which can be studied equally by the engineer, mine owner and government regulatory body, can also provide a great deal of information, which in many cases, may be adequate for control purposes. Such aerial surveys should be made at regular intervals and at least annually or at time intervals considered adequate for the particular tailings dam.

2.14. CASE HISTORY

As an example of the instrumentation and monitoring system for an upstream tailings dam, a short description will be given of the tailings dam at the copper mining plant Assarel in Bulgaria. (see Fig. 1 and 2).

Ground level at the position for the downstream toe is 639 m above sea level. The tailings dam has a starter dam 85 m high that was built with an extended toe forming a drainage blanket 250 m long that is 18 m high at its upstream end, sealed with a sloping impervious layer. This arrangement (advocated by ICOLD Bulletin No.97) caused a beach to form as soon as the first tailings were discharged from spigots on the starter dam. The tailings flowed across the extended toe, depositing the coarsest, then progressively finer particles over the whole 250 m width, the slimes discharging over the impervious layer to form the beginning of the impoundment.

The tailings dam was designed to be raised to a height of 190 m above the downstream toe, and it has been under operation since the end of 1989. On 1st September 1995, the material deposited was already 9 m higher than the starter dam crest.

Pore pressure measurements were made with standpipe piezometers on 7 cross-sections. In every section there are six pipes with 60-80 m spacing between them. They were installed before spigotting began and are resting on the ground. Shallower standpipe piezometers, designed to register the inclination of the equipotential lines due to the anisotropy, are to be installed later.

Des appareils à corde vibrante sont installés seulement dans les trois profils centraux :

- des piézomètres, avec télétransmission des lectures des niveaux piézométriques, sont placés au fond des tubes piézométriques;

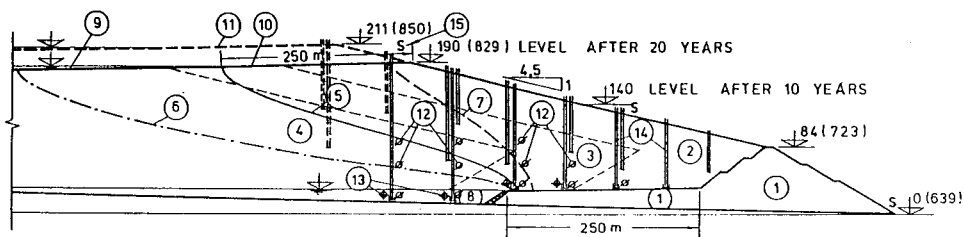
- des piézomètres, du même type, sont installés à l'extérieur des tubes piézométriques sur de petits blocs de béton reposant sur le sol de fondation, et d'autres sont prévus sur deux autres niveaux plus élevés, pour les mesures de pressions interstitielles et de pressions interstitielles sous chargement dynamique;

- des couples de cellules de pression totale (positions horizontale et verticale) ont été installés dans les premières couches de stériles en trois points, et en un point sur la paroi en béton de l'ouvrage de décantation.

Les tubes piézométriques sont en fibres de verre et sont entourés de plaques de tassement en métal inoxydable, espacées de 5 mètres, servant à mesurer les tassements différentiels. Les tubes ont des emboîtements rigides. Les plaques suivent les tassements des stériles, indépendamment des tubes piézométriques. Pour les barrages de stériles, où les tassements dans les zones internes sont très élevés, cette dernière solution est préférable aux tubes télescopiques.

Les Fig. 1 et 2 donnent l'emplacement des divers dispositifs de mesures.

Des câbles relient les appareils électriques à une salle de contrôle située dans un bâtiment construit à l'aval du barrage, sur la rive gauche, au niveau de la crête du remblai d'amorce; la salle contient le tableau des appareils d'enregistrement des mesures et l'ordinateur.



Vibrating wire instruments were installed only in the middle three cross-sections :

- they consist of piezometers put in the bottom of the standpipe piezometers for the remote reading of the piezometric levels;

- piezometers of the same type were installed outside the standpipes, on small concrete blocks on the ground and will be placed on the surface at two other, higher levels for pore pressure and dynamic pore pressure measurements;

- pairs of total pressure cells in the horizontal and vertical positions were placed in the first layers of tailings at three positions and at one position on the concrete surface of the decant.

The standpipe piezometers use fiber-glass pipes, and have settlement plates of noncorrosive metal put over them, at 5 m vertical intervals. This enables them to measure settlements and differential settlement. The pipes have rigid splices so that the settlement plates, which settle together with the tailings, can slide independently from the standpipes. This is a more suitable solution for tailings dams than using pipes with sliding telescopic joints, since the settlements in the inside parts of the tailings facility are large.

Fig. 1 and 2 show in detail the disposition of the various devices.

The connecting cables from the electrical instruments, lead to a control room located in a building, downstream of the tailings dam, on the left bank at the level of the crest of the starter dam, where the information and calculation desk and the computer are situated.

Fig. 1

Tailings Dam of Upstream Construction
Assarel Tailings Dam (Bulgaria). Cross Section.
Barrage de stériles construit par la méthode amont
Barrage de stériles d'Assarel (Bulgarie) - Coupe transversale.

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Starter dam - rockfill. 2. Tailings - with mean size $d_m \approx 0.08$ mm 3. Tailings - with mean size $d_m \approx 0.05$ to 0.06 mm 4. Fine tailings - with mean size $d_m \approx 0.03$ to 0.04 mm 5. Mean phreatic surface 6. Minimum phreatic surface 7. Maximum phreatic surface 8. Initial decanting pond 9. Decanting pond 10. Beach 11. Second stage dam 12. \emptyset Remote reading piezometers 13. \oplus Total pressure cells 14. Standpipe piezometers and settlement gauges 15. S Seismographs | <ol style="list-style-type: none"> 1. Remblai d'amorce - enrochement 2. Stériles - diamètre moyen $d_m \sim 0,08$ mm 3. Stériles - $d_m \sim 0,05 - 0,06$ mm 4. Stériles fins - $d_m \sim 0,03 - 0,04$ mm 5. Ligne de saturation moyenne 6. Ligne de saturation minimale 7. Ligne de saturation maximale 8. Retenue de décantation initiale 9. Retenue de décantation 10. Plage 11. Seconde étape de construction 12. \emptyset Piézomètres avec télémesure 13. \oplus Cellules de pression totale 14. Tubes piézométriques et dispositifs de mesure des tassements 15. S Sismographes |
|---|--|

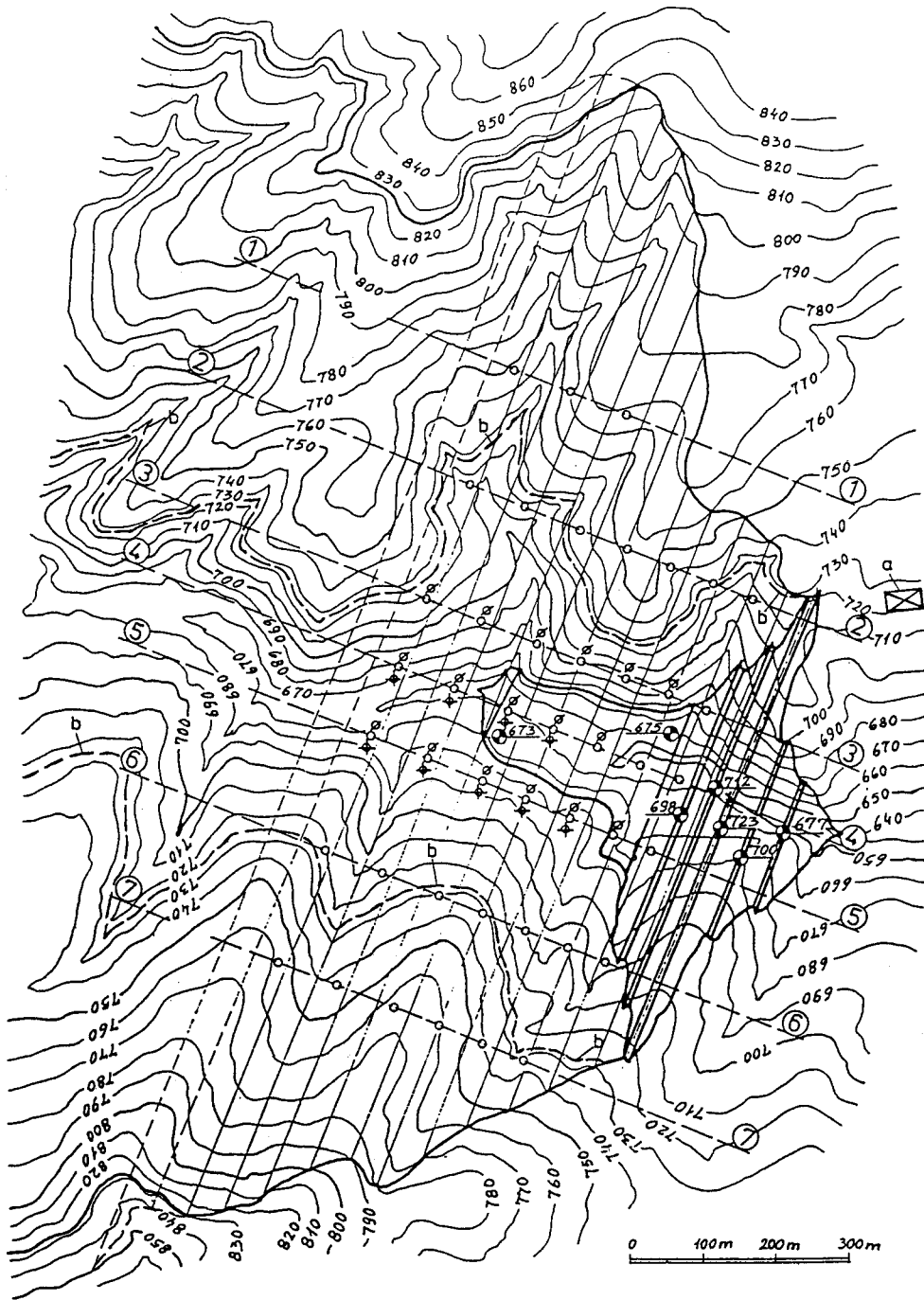


Fig. 2

Plan of Assarel Tailings Dam (Bulgaria)
Barrage de stériles d'Assarel (Bulgarie) - Vue en plan

a - Control station

b - Level of deposited tailings at 1st September
1994

a - Bâtiment de contrôle

*b - Niveau des stériles mis en dépôt, au 1^{er} sep-
tembre 1994*

Le sismographe principal est situé dans la fondation du bâtiment précité, et deux autres sismographes auxiliaires seront installés dans le talus aval du barrage de stériles à des niveaux supérieurs (Fig. 1 et 2). Lorsque le sismographe principal enregistre une accélération dépassant 0,01 g, le dispositif de lecture automatique accélérée des pressions interstitielles, au moyen des piézomètres à corde vibrante, est mis en fonctionnement.

Toutes les autres observations et mesures indiquées ci-dessus sont exécutées manuellement. Leurs résultats sont mis en mémoire dans l'ordinateur, et des sorties automatiques de graphiques, sous diverses présentations, peuvent être obtenues à tout moment.

The main seismograph is located in the foundation of this building, and two more, auxiliary seismographs will be placed in the downstream slope of the tailings dam at higher levels, as indicated by the Fig. 1 & 2. When the main seismograph registers an acceleration exceeding 0.01 g, the system of automatic accelerated reading of the dynamic pore pressures by the vibrating wire piezometers is triggered into action.

All the other observations and measurements mentioned above, are also carried out manually. Their results are put into the computer memory and can be presented graphically by the automatic data base in various ways and under different relations for any moment.

3. BARRAGES DE STÉRILES CONSTRUITS PAR LA MÉTHODE AVAL

Ce type de barrage utilise également les stériles comme matériau de construction, les éléments grossiers étant obtenus au moyen d'hydrocyclones (voir Bulletin CIGB : Barrages de Stériles : conception, construction, exploitation et réhabilitation).

Deux remblais d'amorce, l'un à l'amont, l'autre au pied aval, définissent l'étendue de la fondation du barrage principal (Fig. 3). Au début, les cyclones sont installés sur la crête du remblai d'amorce amont, et le barrage principal est constitué de sables provenant des cyclones. Compte tenu de la forte perméabilité du matériau sableux du barrage, les dispositifs de drainage au niveau de la fondation sont peu importants et peuvent consister en une simple couche drainante s'étendant du remblai d'amorce amont jusqu'au pied du barrage aval perméable. Si la surface de fondation est accidentée, un réseau de drains en forme d'antenne, bien espacés sur l'ensemble de la surface, doit être prévu au lieu d'un tapis drainant continu. Lors du cyclonage, le sable s'écoule lentement (ou flue) sur le talus aval à partir des points de déversement. Le sable cycloné déversé étant de très faible consistance, les tassements du barrage peuvent être importants.

Si cela est économiquement justifié, les tassements du remblai du barrage peuvent être diminués et la résistance du matériau augmentée en compactant le sable par couches au moyen de rouleaux vibrants. Ainsi, le barrage de stériles, même s'il présente un talus aval raide, aura une bonne résistance aux séismes.

La zone sableuse cyclonée tend à être à peu près homogène. Les boues (débit en suspension) provenant du cyclone sont déversées à l'amont pour constituer et maintenir une plage. La ligne de saturation s'abaisse dans la zone des percolations de la retenue vers le barrage en sable.

Bien que ce type de barrage de stériles présente une sécurité satisfaisante, il nécessite cependant un contrôle soigné de son comportement afin de déceler suffisamment tôt toutes anomalies.

3.1. PRESCRIPTIONS RELATIVES A L'AUSCULTATION

Les divers éléments à mesurer sont :

- débit de percolation;
- ligne de saturation, sous la plage de boues ainsi que dans les sables cyclonés;
- pression interstitielle dans la zone de la plage de boues, adjacente au barrage en sable, ainsi que dans ce dernier;
- sismicité et pression interstitielle induite dans le barrage en sable;

3. TAILINGS DAMS OF DOWNSTREAM CONSTRUCTION

This type of tailings dam also uses tailings as construction material, obtaining the coarsest fraction from the tailings with hydrocyclones (see ICOLD Bulletin "Tailings Dams: A Guide to the Design, Construction, Use and Rehabilitation").

Two starter dams, an upstream dam and a toe dam define the foundation extent of the main dam, as shown by Fig. 3. The cyclones are initially installed on the upstream starter dam crest, and the main dam is constructed from the cycloned sand. Because the sandy dam material has a high permeability, minimal drainage features are required at foundation level and they may consist simply of a drainage layer from the upstream starter dam to the permeable downstream toe dam. If the foundation surface is hilly, the design should consider a network of finger drains, well spaced over the whole area, instead of a continuous drainage layer. During cycloning, the sand slowly flows (or creeps) from the discharge points down the downstream slope. When the cycloned sand is simply tipped in a very loose condition, the overall dam settlement may be considerable.

If economically justified, the dam embankment settlement can be decreased and the material's strength increased by compacting the sand in layers, using vibrating rollers. With this treatment, the tailings dam can be made almost earthquake resistant, even with relatively steep downstream slopes.

The cycloned sand fill tends to be almost homogeneous. The slimes from the cyclone overflow are spigotted upstream to produce and maintain a beach. The phreatic surface drops as seepage flows from the pond towards the sand dam.

While this type of tailings dam tends to be relatively safe, it is nevertheless advisable to take careful observations of its behaviour to obtain early warning of anything going wrong.

3.1. MONITORING REQUIREMENTS

The following items should be measured :

- seepage discharge;
- phreatic surface, both under the slimes beach and in the cycloned sand;
- pore pressure in that part of the slimes beach adjacent to the sand dam and within the sand dam itself;
- seismicity, and dynamic pore pressures that may be induced in the sand dam;

- pression totale dans les parties basses du barrage (si nécessaire);
- déplacements verticaux et horizontaux du remblai de pied;
- tassements différentiels dans le barrage en sable, enregistrés au moyen des dispositifs de mesure des déplacements internes;
- revanche au-dessus de la plage de boues et de la retenue, par rapport à la crête du barrage en sable;
- pente du talus aval du barrage en sable;
- largeur de la plage constituée de boues;
- granulométries du débit en suspension et du débit de fond du cyclone, et teneur en éléments solides dans ces deux débits;
- pression dans la conduite, aux premier et dernier cyclones;
- caractéristiques géotechniques (densité, résistance au cisaillement, compressibilité, consolidation) des sables et boues mis en dépôt, et leur non-linéarité lors de l'augmentation de la charge appliquée;
- ségrégation des boues sur la plage.

La plupart des mesures et des appareils correspondants sont identiques à ceux utilisés dans les barrages de stériles construits par la méthode amont. Aussi, leur présentation sera-t-elle ici plus brève.

3.2. DÉBIT DE PERCOLATION

Le débit de percolation peut être important car l'eau de transport associée au sable du cyclone sera recueillie par les drains sous-jacents se raccordant au barrage de pied qui doit être parfaitement perméable. S'il est nécessaire d'utiliser des matériaux imperméables pour le barrage de pied, les exutoires des drains doivent traverser sa base. Le débit de percolation est mesuré à chaque exutoire, à l'aval du remblai de pied, au moyen d'un seuil de jaugeage.

3.3. LIGNE DE SATURATION

Si le sable constituant le barrage est compacté au rouleau vibrant, les relevés de tubes piézométriques peuvent déterminer la ligne de saturation, celle-ci ayant une position basse et les lignes équipotentiels tendant à devenir presque verticales, bien qu'elles puissent s'incliner légèrement sous l'action des drains. Aussi, n'est-il pas nécessaire, en général, de mesurer la pression hydrostatique à deux hauteurs sur une verticale donnée.

On peut également déterminer la ligne de saturation au moyen de piézomètres, avec télémesure, situés dans la zone externe plus sableuse. Dans cette zone, les appareils indiquent une pression correspondant au réseau réel d'écoulement, du fait qu'aucune surpression interstitielle ne s'y forme.

Si le matériau constituant le barrage n'est pas compacté mécaniquement, le sable provenant du cyclone glisse vers le bas du talus aval. Il exerce une pression

- total pressure in the lower parts of the dam (if required);
- vertical and horizontal movement of the toe dam;
- differential settlement in the sand dam registered by the internal movement devices;
- freeboard above the slimes beach and pond to the crest of the sand dam;
- check on the inclination of the downstream slope of the sand dam;
- width of the slimes beach;
- particle size distribution of the cyclone underflow and overflow and percentage of the solids of these two parts;
- pressure in the pipeline at the first and at the last cyclone;
- soil mechanics properties (density, shear strength, compressibility, consolidation) of the deposited sand and slimes and their non-linearity when increasing the applied load;
- segregation of the slimes deposited on the beach.

Most of the measurements and the respective instruments are the same as those used in tailings dams of upstream construction. Because of this, only the briefest details will be given below.

3.2. SEEPAGE DISCHARGE

The seepage discharge can be considerable, because the transportation water flowing together with the cyclone sand will be collected by the under drains, which connect with the toe dam that clearly should be quite permeable. If it is necessary to use impermeable material for the toe dam, then the drain outlets should pass through its base. The seepage discharge is measured by weirs at each outlet, downstream of the toe dam.

3.3. PHREATIC SURFACE

If the sand dam is compacted with vibrating rollers, the phreatic surface can be determined from the readings of standpipe piezometers, because the phreatic surface is low lying and the equipotential lines tend to be almost vertical, although they may become slightly inclined from the action of the drains. It is not usually necessary therefore to measure the hydrostatic pressure at two heights on a given vertical.

The phreatic surface can also be determined from remote reading piezometers that are in the more sandy, outer part. Here they show a pressure corresponding to the actual flow net, because no excessive pore pressure is formed there.

If the sand dam is not compacted mechanically, then the sand coming from the cyclone slides down the downstream slope. It exerts pressure on the standpipe

sur les tubes piézométriques qui se courbent. Si ces tubes sont en PVC, ils peuvent se casser. Les tubes en acier galvanisé sont donc préférables; ils peuvent également subir une flexion sous la charge provenant du sable cycloné en mouvement, mais ne se rompent pas facilement. Les tubes piézométriques qui subiront une forte inclinaison doivent être remplacés; cette opération doit être envisagée lors du projet.

La ligne de saturation dans les boues ne peut pas être connue avec précision au moyen de piézomètres, compte tenu de la surpression interstitielle importante susceptible d'exister dans cette zone, de sorte que les pressions interstitielles mesurées ne peuvent indiquer la ligne de saturation réelle. Les lignes équipotentiellles sont très inclinées dans la zone de la plage de boues.

3.4. PRESSION INTERSTITIELLE

Les pressions interstitielles dans un barrage en sable perméable tendent à être égales aux pressions interstitielles correspondant à l'état permanent.

Les pressions interstitielles sous la plage de boues peuvent être élevées et devront être mesurées, au moins dans la zone proche du barrage en sable, où elles ont une influence sur le glissement vers le talus aval ainsi que sur le glissement du barrage en sable vers la plage de boues.

3.5. SÉISMICITÉ ET PRESSION INTERSTITIELLE INDUITE

Le risque de liquéfaction est très faible si le sable du barrage est compacté mécaniquement.

En raison de ses caractéristiques granulométriques et de sa faible densité, le barrage en sable est sensible à la liquéfaction s'il n'est pas compacté mécaniquement. Il doit être bien drainé, et spécialement s'il n'est pas compacté mécaniquement, de façon à réduire le risque de liquéfaction sous l'effet d'un séisme. On peut mesurer la pression interstitielle sous chargement dynamique au moyen de piézomètres à réponse rapide, tels que ceux du type « à corde vibrante ».

En vue de mettre en fonctionnement les piézomètres à corde vibrante lors d'un séisme, il est nécessaire d'installer un dispositif (accélérographe pour fortes secousses), qui envoie un signal, au-dessus d'un certain niveau d'accélération sismique, donnant l'ordre à l'ordinateur de recueillir, à une fréquence accélérée, les lectures de tous les appareils de mesure.

La séismicité devra être mesurée dans le cas de barrages de stériles de grande hauteur, situés dans des régions sismiques, en vue de déterminer les caractéristiques des séismes, les propriétés dynamiques du matériau, et d'évaluer le niveau de déformations correspondant à chaque intensité sismique.

piezometers and bends them. If they are made of PVC, they may get broken, so it is preferable to use galvanised steel pipes. They are also likely to bend under the load from the creeping cycloned sand, but they don't break easily. Standpipe piezometers, which develop considerable inclination, must be replaced, and such replacement should be envisaged in at the design stage.

The phreatic surface in the slimes cannot be determined accurately with piezometers, since there may be considerable excess pore pressures at any given location, so that the measured pore pressures can not indicate the true phreatic surface. The equipotential lines are very inclined in the slimes beach area.

3.4. PORE PRESSURE

The pore pressures in a permeable sand dam tend to be equal to the steady state pore pressures.

Pore pressures under the slimes beach can be considerable and should be measured, at least in the area close to the sand dam. There it exerts influence both on sliding towards the downstream slope and on sliding of the sand dam towards the slimes beach.

3.5. SEISMICITY AND INDUCED DYNAMIC PORE PRESSURE

The danger of liquefaction is very small if a sand dam is compacted mechanically.

Because of the character of its particle size distribution and its low density, the sand dam is susceptible to liquefaction if it is not compacted mechanically. It needs to be well drained, and particularly so if not compacted, to reduce the risk of liquefaction during an earthquake. Dynamic pore pressures can be measured with rapid response piezometers, such as those equipped with vibrating wire transducers.

To trigger vibrating wire piezometers in case of earthquake, it is necessary to install a device of the strong motion accelerograph type, which sends a signal above a certain level of seismic acceleration to command the computer to begin an accelerated period of reading all instruments.

Seismicity should be measured in high tailings dams in earthquake regions in order to determine their earthquake characteristics, the dynamic characteristics of the material, and to evaluate the level of deformations likely to occur at different earthquake intensities.

3.6. DÉPLACEMENTS VERTICAUX ET HORIZONTALS

Au cours de l'exploitation, beaucoup de surfaces du barrage sont provisoires, de sorte que des repères de référence ne peuvent être installés. Ils peuvent, cependant, être placés sur la crête du barrage de pied aval. A la fin des opérations, des points de référence seront installés sur la crête du barrage en sable et sur les risbermes situés sur le talus aval.

3.7. PENTE DU TALUS AVAL DU BARRAGE

Le talus aval du barrage sera relevé périodiquement (au moins une fois par an), au moyen de mesures photogrammétriques, afin de vérifier que l'angle du talus répond aux spécifications du projet, et en vue de contrôler le bilan sable-boue et de s'assurer que la revanche est suffisante.

3.8. TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS DANS LE REMBLAI

On mesure les tassements différentiels dans le barrage en sable compacté de la même façon que dans les barrages de stériles construits par la méthode amont et avec le même appareillage.

Dans les barrages en sable non compacté, les tubes verticaux subiront des pressions latérales et s'inclineront; les plaques destinées à la mesure des tassements ne pourront se déplacer librement vers le bas au cours du tassement des stériles.

3.9. PRESSION TOTALE

Tout ce qui a été indiqué à ce propos, dans le cas des barrages de stériles construits par la méthode amont, s'applique aussi aux barrages en sable.

3.10. ÉCHANTILLONS ET ESSAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS EN LABORATOIRE

Les méthodes et recommandations présentées à ce propos pour les barrages de stériles construits par la méthode amont sont valables pour les barrages construits par la méthode aval.

3.6. VERTICAL AND HORIZONTAL MOVEMENTS

During operation many surfaces of the dam must be considered as provisional, so that reference points cannot be established. They can, however, be placed on the crest of the toe dam. At the end of operations, reference points should be installed on the sand dam crest and on its berms on the downstream slope.

3.7. INCLINATION OF THE DOWNSTREAM SLOPE OF THE DAM

The downstream slope of the dam should be periodically (at least once a year) established by photogrammetric surveys to check that the angle of the slope is developing according to design requirements, and in order to monitor the balance between the sand and the slimes and to ensure that there is sufficient freeboard.

3.8. DIFFERENTIAL SETTLEMENTS IN THE EMBANKMENT

The differential settlements in a compacted sand dam are measured in the same way as in tailings dams of upstream construction and with the same equipment.

In non-compacted sand dams the vertical standpipes will be subjected to lateral pressure and will become inclined, and the settlement plates will not be able to move freely downwards during the settlement of the tailings.

3.9. TOTAL PRESSURE

The remarks made about the measurement of total pressures in tailings dams of upstream construction applies also for these sand dams.

3.10. SAMPLING AND SOIL MECHANICS LABORATORY TESTS

The methods and suggestions made in relation to sampling and testing for tailings dams of upstream construction is also valid for the dams constructed by the downstream method.

3.11. MÉTHODE DE MISE EN PLACE DES STÉRILES

Dans le cas des barrages construits par la méthode aval, le contrôle de la mise en place des stériles revêt une grande importance, afin d'obtenir toutes les informations permettant d'améliorer et d'optimiser les caractéristiques mécaniques des stériles mis en dépôt et la technique de mise en place.

Les paramètres technologiques à contrôler concernent le bilan quantitatif débit de fond – débit en suspension des cyclones. Lorsque le stockage est réalisé dans une vallée et que le barrage de retenue est construit en travers de vallée, la hauteur correspondant à un volume donné de stériles stockés diminue au fur et à mesure que la retenue se remplit. Au début des opérations, le bilan est négatif, c'est-à-dire que la quantité de stériles grossiers n'est pas suffisante pour maintenir la hauteur du barrage au-dessus des boues stockées; il est donc nécessaire parfois d'importer du remblai pour la construction de digues sur le côté amont du barrage. A la fin des opérations, le bilan tend à devenir positif, c'est-à-dire que le volume de stériles grossiers provenant du débit de fond des cyclones est plus que suffisant pour maintenir, en toute sécurité, la crête du barrage au-dessus du niveau des boues stockées; mais, au cours de ces dernières étapes, cette différence de niveau doit être réduite pour éviter un glissement du sable du barrage vers les boues stockées. Cette variation de la demande nécessite divers réglages des cyclones le long de la conduite d'alimentation, au cours de la période de construction. La pression d'alimentation et la dimension de l'ajutage de sortie du débit de fond (ajutage en caoutchouc) influencent la granulométrie du débit en suspension des cyclones, ainsi que le pourcentage d'éléments solides dans ces deux débits; il y aura donc bien lieu de procéder à des réglages pour obtenir les meilleurs résultats, compte tenu des conditions particulières. On vérifiera la dilution ou la densification du débit de fond et du débit en suspension, ainsi que la pression dans la conduite d'alimentation aux premier et dernier cyclones. La largeur de la plage de boues et la ségrégation des boues déposées sur la plage seront aussi contrôlées.

Le bilan volume de fond – volume en suspension peut conduire à un réglage de la pente du talus aval. Au début des opérations, où la pente doit être raide pour obtenir le maximum de gain en hauteur, cette raideur est limitée par des considérations de stabilité. Par contre, lors des dernières phases, cette pente doit être douce afin de s'approcher du profil en travers final du barrage. Tout ceci est obtenu en contrôlant le fonctionnement des cyclones.

3.12. EXEMPLE

Le barrage de stériles de l'exploitation minière de cuivre d'Elatzite (Bulgarie), en exploitation depuis 1981, est donné comme exemple d'auscultation d'un barrage de stériles, de grande hauteur, construit par la méthode aval. Un profil en travers type est donné sur la Fig. 3.

3.11. TAILINGS PLACEMENT PROCEDURE

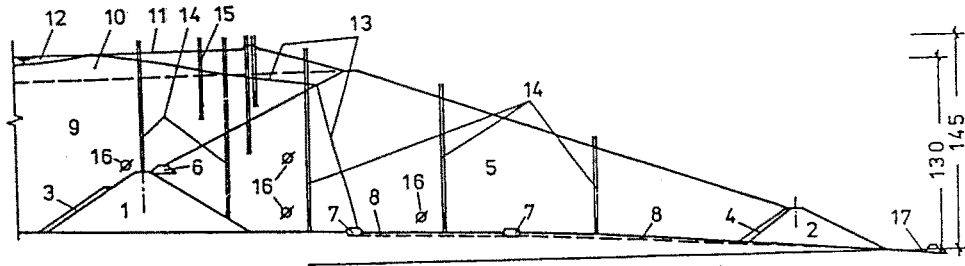
Control of placement of the tailings to form the dam by downstream construction is of great importance in order to gather all necessary information needed to improve and optimize the weight and condition of the deposited tailings and the deposition technique.

The technological parameters that should be monitored are the balance between the cyclones underflow and overflow quantities. When storage is to be in a valley and the dam is built across the valley to retain the impoundment, the height gained by given volumes of stored tailings decreases as the impoundment fills. In the early stages this balance is negative, i.e. the coarse fraction is not sufficient to keep the height of the dam above the impounded slimes, so that in some situations it may be necessary to import fill for the construction of dykes on the upstream side of the dam. In the last stages the balance tends to be positive, i.e. the volume of coarse fraction coming from the underflow of the cyclones is more than sufficient to keep the dam crest safely above the level of the impounded slimes, but during these last stages this height difference must be limited to avoid the sand of the dam from sliding towards the impounded slimes. This variation of demand requires different adjustment of the cyclones along the feeding pipeline, during the construction period. Supply pressure and the size of the adjustable rubber underflow orifice affects the grain size distribution of the cyclones underflow and overflow and percentage of solids in these two parts, which can be adjusted to give best results for the particular conditions. Checks have to be made on the dilution or densification of the underflow and overflow slurries and the pressure in the pipeline at the first and at the last cyclone. Also observations should be made of the width of the slimes beach and segregation of the slimes deposited across it.

The balance between the overflow and underflow volumes can be assisted by varying the inclination of the downstream slope. In the early stages, when it must be quite steep to produce maximum gain in height, is limited by considerations of stability. On the other hand, during the last stages this inclination needs to be gentle in order to approach the final design cross-section of the tailings dam. All this can be obtained through control of the cyclones operation.

3.12. CASE HISTORY

This is of the instrumentation and monitoring system of a high tailings dam built by downstream construction, in operation since 1981, at the copper mining plant "Elatzite" in Bulgaria. A typical cross section is shown by Fig. 3.



La hauteur finale du barrage sera de 145 m. Les stériles ont un diamètre moyen de 0,068 mm et la quantité d'éléments inférieurs à 0,074 mm est de 70 % en moyenne. Au début de 1981, 75 cyclones de 0,5 m de diamètre étaient installés sur la crête du remblai d'amorce. En 1989, il y en avait 130 répartis sur une longueur de 1 600 m. Au cours de la première année, en vue de maintenir la zone de sable plus haute que celle des boues, les cyclones furent réglés pour produire 42 % environ de sable sur la quantité totale de stériles. A cette époque, le niveau du sable risquait de ne pas se maintenir au-dessus de celui des boues. Le bilan sable-boue fut progressivement amélioré et, au cours de la deuxième année, le remblai de sable dépassait de 2,30 m le niveau des boues; ce dépassement atteignait 8 m au cours de la sixième année, bien que le sable séparé ne représentât alors que 32 %. Afin que cette différence de hauteur ne fût pas supérieure à 8 m, ce qui pouvait compromettre la stabilité du talus amont du barrage en sable, le fonctionnement des cyclones, à partir de la septième année, fut discontinu, la totalité des stériles étant déversée sur la plage amont qui précédemment avait été formée en utilisant seulement le débit en suspension des cyclones. Cette méthode constituait des couches de matériaux grossiers au-dessus des boues, assurant un drainage et améliorant la stabilité globale; elle permettait aussi de limiter la différence de hauteur entre le remblai de sable et la plage de boues, ce qui était souhaité. Les couches de matériaux grossiers plus stables permettaient d'accéder à la plage pour forer des tubes piézométriques, et de marcher sur la plage pour relever périodiquement les tubes piézométriques déjà installés, la mise en dépôt s'effectuant sur une autre zone. Les derniers 15 m de la hauteur du barrage seront construits en utilisant la méthode amont, sans mettre en œuvre des cyclones.

Le débit de percolation est recueilli à l'aval du pied du barrage, aux trois exutoires du dispositif de drainage, et mesuré au moyen de seuils de jaugeage. Des

Fig. 3

Tailings Dam of Downstream Construction
 Elatzite Tailings Dam (Bulgaria). Cross Section
Barrage de stériles construit par la méthode aval
Barrage de stériles d'Elatzite (Bulgarie) - Coupe transversale

- | | |
|---|---|
| 1. Upstream starter dam - pervious | 1. Remblai d'amorce amont - perméable |
| 2. Downstream starter dam - pervious | 2. Remblai d'amorce aval - perméable |
| 3. Impervious layer | 3. Couche imperméable |
| 4. Filter | 4. Filtre |
| 5. Compacted cycloned sand | 5. Sable cyclonné compacté |
| 6. Secondary dyke | 6. Digue secondaire |
| 7. Drains | 7. Drains |
| 8. Drain outlets | 8. Exutoires des drains |
| 9. Slimes (cyclone overflow) | 9. Boues (débit en suspension du cyclone) |
| 10. Spigotted tailings | 10. Stériles déversés |
| 11. Beach | 11. Plage |
| 12. Pond | 12. Retenue |
| 13. Phreatic surface | 13. Ligne de saturation |
| 14. Standpipe piezometers and settlement gauges | 14. Tubes piézométriques et dispositifs de mesure de tassements |
| 15. Floating standpipe piezometer | 15. Tube piézométrique « flottant » |
| 16. Remote reading piezometers | 16. Piézomètres, avec télémesure |
| 17. Reclaim pond | 17. Bassin de récupération |

The final height of the tailings dam will be 145 m. The tailings have a mean diameter of 0.068 mm and on average the quantity of the particles smaller than 0.074 mm is 70 %. At the beginning in 1981, 75 cyclones with body diameters of 0.5 m were installed on the starter dam crest. By 1989 their number had been increased to 130, spread over a length of 1600 m. During the first year, in order to maintain the sand part higher than the slimes, the cyclones were adjusted to produce about 42 % of sand from the total tailings quantity. At that time there was a danger that the sand level could not remain above the slimes level. The balance of sand and slimes was gradually improved and during the second year the height of the sand dam exceeded the slimes level by 2.30 m. In the sixth year the sand was 8 m higher, although by then the cyclones had been adjusted to only produce 32 % of sand from the tailings. In order not to raise the sand level by more than 8 m above the level of the slimes, which could have endangered the stability of the upstream slope of the sand dam, from the seventh year onwards the use of the cyclones was discontinued periodically, with discharges of the entire tailings by spigotting on to the upstream beach that had been developed previously using only the overflow fraction from the cyclones. This procedure created layers of coarser material over the slimes, which tended to act as drainage layers and improved overall stability. It also had the desired effect of limiting the height difference between the sand and the slimes beach. The more stable layers of coarser material permitted access to the beach to drill down standpipe piezometers and to walk on the beach to take measurements from existing standpipe piezometers periodically, when the deposition is going on at another place. The last 15 m height of the tailings dam will be constructed using the upstream method, without the use of cyclones.

The seepage discharge is collected downstream of the toe dam at 3 drain outlets and is measured by weirs. The phreatic surface was determined by standpipe

tubes piézométriques dans le remblai de sable ainsi que dans le remblai de boue permettaient de déterminer la ligne de saturation. Les tubes piézométriques étaient, au début, en PVC. Du fait de l'écoulement des sables humides cyclonés, ces tubes PVC s'inclinaient de plus en plus et finalement se cassaient. Ils furent remplacés par des tubes en acier qui, eux aussi, s'inclinaient à la longue. La ligne de saturation enregistrée n'était qu'à 5 m au-dessus du sol de fondation. La position basse de cette ligne assure la stabilité du barrage sous séisme.

piezometers, initially made using PVC pipes, in the sand dam, as well as in the slimes. Because of the creeping of the cycloned wet sand they were tilted more and more and finally were broken. They were replaced by steel pipes, which in time also became inclined. The registered phreatic surface was only 5 m above the original ground level. This low phreatic surface ensures the stability of the dam during earthquake conditions.

4. BARRAGES DE STÉRILES A RETENUE D'EAU

L'auscultation des barrages de stériles de ce type est presque identique à celle des barrages classiques en terre (voir Bulletins CIGB n^{os} 41, 60, 68, 87 et document USBR, 1987). Les seules différences concernent le contrôle des effets sur l'environnement.

L'utilisation d'un barrage à retenue d'eau est souvent nécessaire lorsque les stériles stockés ont une toxicité telle qu'aucun entraînement de matériau en dehors de la retenue, sous l'action du vent, n'est toléré pour des raisons environnementales. Les stériles sont généralement déposés sous l'eau dans la retenue, et maintenus immergés. L'évacuation de l'eau de la retenue peut s'effectuer au moyen d'un évacuateur de crue classique, mais elle doit être recueillie pour retour à l'usine de traitement, ou purifiée avant évacuation. L'eau de percolation est généralement plus claire et de plus faible débit, comparativement aux autres types de barrages de stériles.

4. TAILINGS DAMS OF WATER RETENTION TYPE

Instrumentation and monitoring of tailings dams of this type are almost the same as for ordinary earthfill dams, as discussed by ICOLD Bulletins Nos. 41, 60, 68, 87 and USBR (1987). They differ only in what is necessary in case of environmental control requirements.

The use of normal water retaining dams is often required when the stored tailings are sufficiently toxic for the environmental stipulation to have been made that none must be allowed to be carried away from the impoundment by wind. The tailings are commonly discharged under water into the impoundment from the upstream end, and are kept below the surface of the water. The discharge of water from the impoundment can be made over a normal spillway, although it must be collected for return to the processing plant or purified before discharge. Any seepage water tends to be cleaner and in much smaller quantity in comparison with the other types of tailings dams.

5. AMÉLIORATION DE L'AUSCULTATION DE BARRAGES DE STÉRILES EXISTANTS

L'amélioration de l'auscultation de barrages de stériles existants peut être nécessaire dans deux cas : aucun appareil de mesure n'équipe l'ouvrage, ou le dispositif d'auscultation est insuffisant pour bien connaître son comportement.

Les raisons conduisant à réexaminer le dispositif d'auscultation existant sont les suivantes :

- augmentation des percolations, signes d'érosion, déformations importantes, fissures, rupture locale, etc...
- changement dans la fonction du barrage, résultant de la nécessité d'un stockage supplémentaire de stériles, de l'augmentation de la capacité de l'exploitation minière conduisant à plus de stériles, ou d'un broyage plus fin des stériles;
- sécurité plus grande exigée pour le barrage par les autorités de contrôle;

- contraintes écologiques plus fortes;
- réévaluation du niveau de sismicité;
- réévaluation des conditions hydrologiques et, principalement, des crues exceptionnelles;
- détérioration ou non-fonctionnement d'une partie des appareils de mesure, indications des appareils comportant des erreurs, traduisant que leur durée de vie est atteinte à un moment où il est nécessaire de surélever le barrage de stériles;
- adoption d'un système de contrôle à distance, de l'automatisation, d'un traitement des mesures sur ordinateur.

Tout d'abord, on doit examiner de près les points suivants :

- situation actuelle du barrage de stériles;
- conception du barrage, avec réexamen compte tenu des conditions actuelles;
- résultats fournis par les observations et les mesures;
- fonctionnement et état actuel des appareils de mesure, vérification de leur étalonnage, etc;
- mesures et observations requises jusqu'à maintenant;
- mesures et observations omises jusqu'à maintenant;
- endroits où des mesures sont omises;
- mesures exécutées avec une précision et une fréquence insuffisantes, points de mesure mal situés.

Ces divers examens permettront de savoir s'il est nécessaire d'ajouter des appareils de mesure, avec indication de leur emplacement, et d'augmenter la fré-

5. IMPROVEMENT OF EXISTING TAILINGS DAM MONITORING

Improvement of existing tailings dam monitoring may be required when the original tailings dam is either not instrumented or has insufficient instrumentation to fully assess its behaviour.

The reasons for reassessment of the existing monitoring system can be :

- increased seepage, indications of erosion, large deformations, cracks, local collapse, etc;
- change in the function of the tailings dam, due to the requirement to store additional tailings, increased rate of delivery due to increased plant capacity or finer milling of the tailings;
- new specifications from the regulatory authority requiring higher safety for tailings dams;
 - higher environmental control requirements;
 - reappraisal of the degree of seismicity;
 - reappraisal of the hydrologic conditions and mostly of the extreme floods;
- damage to part of the existing instruments, their failure or irregularity of their readings, indicating that they have reached the end of their useful life at a time when there is a requirement for further raising of the tailings dam;
- a decision to adopt remote control, automation and computerization.

Firstly a thorough analysis should be made of the following :

- present state of the tailings dam;
- the project design with reappraisal according to the present conditions;
- previous data from observation and measurements;
- performance of the instruments and their present state, checking calibration, etc.;
- measurements and observations required so far;
- measurements and observations omitted so far;
- places where measurements are omitted;
- measurements carried out with insufficient accuracy and frequency, and not at the right place.

On the basis of these investigations it should be decided what further measurements should be taken, where and how frequently they will be needed. It should

quence des mesures. On doit également préciser les moyens permettant de réparer ou de réétalonner certains appareils, et d'incorporer de nouveaux appareils dans le corps du barrage.

Une installation des appareils mal programmée conduit à manquer des mesures importantes, certaines d'entre elles ne pouvant être reprises. Si, au début de la construction, on n'installe pas de dispositifs pour enregistrer les tassements différentiels et les pressions totales, ces dispositifs ne pourront pas être mis en place ultérieurement dans les dépôts de stériles. On ne pourra installer des tubes piézométriques qu'aux endroits accessibles pour les travaux de forage. La mise en place de cellules piézométriques, avec télémesure, pour la mesure des pressions interstitielles dans les zones omises est aussi extrêmement difficile.

La conduite à adopter est généralement la suivante :

Des seuils de jaugeage seront ajoutés pour mesurer les débits des eaux de percolation.

Les tubes piézométriques remplis de stériles doivent être curés au moyen d'une circulation d'eau sous pression. Si cette opération ne réussit pas, les tubes piézométriques seront remplacés.

Lorsque les lignes équipotentielles sont inclinées, de nouveaux piézomètres peu profonds seront installés à proximité des piézomètres profonds. Les tubes peu profonds peuvent être attachés aux parties des tubes profonds sortant du niveau atteint par les stériles et servant ainsi de soutien jusqu'à ce que, avec la montée des stériles, les nouveaux piézomètres soient recouverts. Pour éviter que la prise filtrante du piézomètre ne soit colmatée par les fines déversées, cette prise sera placée dans une excavation suffisamment profonde pour qu'elle ne vienne pas en contact avec les boues récemment déversées. Si les piézomètres sont équipés de plaques pour la mesure des tassements différentiels, ils ne sont pas attachés les uns aux autres; le tube peu profond sera placé à 2 m environ du tube profond.

De nouveaux piézomètres installés depuis la plage sont situés de façon à connaître la position de la ligne de saturation et la forme du réseau d'écoulement. Si la plage est trop humide pour supporter une foreuse, on constituera un large chemin d'accès et une plate-forme de travail en étalant sur les stériles un géotextile et en le recouvrant de sable et de gravier. Dans des cas plus difficiles, des barres de bois ou d'acier seront fixées transversalement au géotextile (longueur des barres égale à la largeur du géotextile), suivant un certain intervalle, afin d'empêcher que le géotextile ne s'enfonce dans les stériles de consistance molle. La même méthode peut être utilisée lorsqu'il est nécessaire d'apporter un pénétromètre ou tout autre équipement sur la plage.

L'accès à la plage étant pratiquement impossible au cours du déversement des stériles, période où la position de la ligne de saturation est la plus haute, les piézomètres doivent être du type « à télémesure ». Un capteur (généralement, un piézomètre complet) pour lecture à distance peut être descendu au fond des tubes piézométriques existants, si le diamètre de ceux-ci est suffisant, ou être installé au fond des nouveaux piézomètres, comme indiqué ci-dessus. Des recommandations relatives à l'installation des appareils ont été données au chapitre 2.

also be decided how to repair or recalibrate some of the existing instruments and how to introduce new instruments in the tailings dam body.

The untimely installation of instruments can result in missing important measurements, some of which cannot be recaptured. If at the beginning of construction the possibility is missed of installing devices to measure differential settlement and total pressures at the base of the impoundment, they cannot be introduced later in the tailings deposit. Standpipe piezometers to be installed in boreholes can only be installed at places accessible for drilling. The installation of the remote reading piezometric cells for measuring the pore pressure in the omitted zones is also extremely difficult.

Commonly it is necessary with an existing dam, to carry out the following modifications :

Add weirs to measure seepage water.

Flush with a powerful water stream any standpipe piezometers that are full of tailings. If this does not work, they must be replaced.

Where it is known that the equipotential lines are inclined, new shallow piezometers should be installed next to the deeper ones. The shallow standpipe piezometers can be tied to the protruding parts of the deeper ones for support until, with the rise of the tailings, the new piezometers become covered. To avoid the risk of clogging by the very finest particles of the discharged slimes, the intake filter of the piezometers should be placed in an excavation, deep enough so that its intake filter is buried and does not come in contact with the freshly spigotted pulp. If the piezometers are provided with settlement plates for measuring the differential settlement, then they should not be tied to each other. The shallow one should be placed about 2 m away from the deeper one.

New piezometers installed from the beach are positioned so as to obtain the position of the phreatic surface and so that the form of the flow net can be constructed. If the beach is too soft to support a drill, a wide path and a platform should be made over the tailings by spreading geotextile covered with sand and gravel to form an access road and working platform. In more difficult cases, wooden or steel bars of length equal to its width, can be tied across the geotextile at intervals in order to prevent the geotextile sheet from sinking in the soft tailings. The same procedure can be used when it is necessary to bring in a penetrometer or other equipment on to the beach.

To avoid the difficulty of inaccessibility to a beach where spigotting is taking place, a time when the highest position of the phreatic surface occurs, piezometers need to be of a type that can be read remotely. A transducer (usually a complete piezometer) for remote reading can be lowered to the bottoms of existing standpipe piezometers, if their pipes are of sufficient diameter, and they can be installed in the bottoms of the new piezometers, as discussed above. Recommendations for the successful installation of instruments have been given in Section 2.

Pour assurer une mesure précise des mouvements des barrages de stériles, il est très souvent nécessaire de contrôler le réseau d'auscultation topographique et de restaurer les stations et repères existants, ou d'en construire de nouveaux.

To accurately measure the movements of the tailings dams, it very often becomes necessary to check the survey control network and to restore existing geodetic monuments or to erect new ones.

6. AUSCULTATION DES BARRAGES DE STÉRILES APRÈS FERMETURE

La réhabilitation commence après la fermeture du dépôt de stériles. Diverses opérations, propres à chaque cas particulier, peuvent être entreprises, telles que la protection des surfaces du dépôt contre l'érosion par l'eau et le vent, en recouvrant ces surfaces avec des rejets miniers propres ou tout autre matériau disponible (terre ou enrochement). Cette protection peut être complétée par une couverture de terre végétaleensemencée en vue de récoltes appropriées. Si la toxicité est élevée, les récoltes ne sont pas consommables; par contre, si le niveau de toxicité est admissible ou le devient après un certain temps, la surface du dépôt peut être utilisée à des fins agricoles. Dans certains cas, les talus sont recouverts de terre, engazonnée et plantée d'arbustes à croissance rapide; il faut, cependant, s'assurer que le ruissellement de surface est intercepté par des fossés et ne pénètre pas dans la retenue de stériles. Le barrage de stériles doit être protégé contre les crues exceptionnelles, et des mesures seront prises pour intercepter la totalité de l'eau de percolation et la recycler.

L'auscultation généralement mise en oeuvre au cours des étapes initiales de réhabilitation comprend des mesures du débit, de la teneur en éléments solides, de la composition chimique et du pH de l'eau de percolation. La surface de saturation sera contrôlée pour vérifier que sa position à l'intérieur du dépôt présente toute sécurité et est suffisamment éloignée du talus aval du barrage. La mesure des pressions interstitielles à l'intérieur du remblai de stériles permet de connaître l'état de consolidation, l'effet et l'efficacité des drains. Les mesures hydrologiques indiqueront l'efficacité des ouvrages de dérivation et d'évacuation. Les tassements seront contrôlés afin de s'assurer que les dispositions hydrologiques ne sont pas annulées par le développement de gradients nuisibles.

Les mesures et les observations seront exécutées de la même manière qu'au cours des dernières années d'exploitation. On mesure les mêmes paramètres, c'est-à-dire ceux se rattachant à la stabilité du barrage, à l'érosion des talus et à la protection de l'environnement. On utilise les mêmes appareils de mesure tant qu'ils donnent des résultats fiables, après la longue période d'exploitation. Les observations et mesures deviennent progressivement moins fréquentes au cours de la période de réhabilitation et de la longue période qui suit, en fonction de la stabilisation du barrage de stériles et de la diminution des risques pour l'environnement.

6. MONITORING OF CLOSED TAILINGS DAMS

Rehabilitation starts when the tailings facility is closed. Depending on the particular details of the individual dam, various types of work may be carried out, such as the protection of the surfaces of the deposit from water and wind erosion by covering with clean mine pit overburden or other available earth or rock materials. This might be supplemented by a covering of humus soil, sown with suitable crops. If toxicity is high, the crops may not be suitable for consumption, but if it is within admissible limits or is reduced to such limits after a certain period, then it may be used for agricultural purposes. Slopes might be covered with earth, grassed and afforested with rapidly growing trees and bushes, although care should be taken to ensure that surface runoff is intercepted by ditches and prevented from entering the tailings pond. The tailings dam should be protected against extreme floods, and measures taken for complete interception and recycling of seepage water.

The monitoring usually required during the initial stages of rehabilitation include measuring the seepage water discharge for its solids content, chemical composition and pH values. The position of the phreatic surface to confirm that it is safely within the impoundment and clear of the downstream slope of the dam. Pore pressure conditions within the impoundment can be used to indicate consolidation, and should show up the effect of the drains, giving a clear indication of their effectiveness. Hydrologic measurements will indicate the effectiveness of the diversion and spillway facilities that have been provided, and settlements need to be checked to ensure that the hydrological arrangements are not being nullified by the development of adverse gradients.

The measurements and the observations should be carried out in the same way as during the last years of operation. The same parameters are measured, i.e. those related to the stability of the dam, the erosion of the slopes and the protection of the environment. The same instruments are used so long as they continue to give reliable results, after the long period of operation. The frequency of observations and measurements usually become progressively less during the rehabilitation phase and during the following long-term period, depending on the success of the stabilization of the tailings dam and the reduction of danger to the environment.

7. TRAITEMENT, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES MESURES

La réussite de l'auscultation d'un barrage de stériles, sur laquelle s'appuie sa construction, son exploitation et sa stabilité, dépend de la fiabilité des données fournies par les appareils de mesure, de leur traitement, de leur analyse et de leur interprétation. Il est donc nécessaire de disposer d'un personnel qualifié, capable d'interpréter immédiatement ces résultats et de fournir une réponse circonstanciée. Certes, les relevés manuels des tubes piézométriques sont simples et fiables, mais il faut souligner l'intérêt que présente l'utilisation de capteurs électriques permettant une télémessure – s'ajoutant à celle d'autres appareils installés dans le barrage de stériles – dans un local central de contrôle, où les lectures sont traitées et analysées.

Il est recommandé que l'interprétation des mesures soit effectuée par un petit groupe de spécialistes, sous la direction d'un ingénieur compétent en matière de barrages de stériles et d'auscultation, et connaissant bien le barrage en question. Le personnel doit disposer de suffisamment de temps pour interpréter à fond les données et faire des recommandations pour que la construction du barrage se déroule en toute sécurité. Pour les grands barrages de stériles, les appareils seront lus, en général, à distance, avec parfois un traitement automatique des données sur ordinateur, les résultats étant présentés sous forme de graphiques. L'acquisition et le traitement automatiques des données sont non seulement plus économiques, mais sont indispensables dans le cas des grands barrages pour les raisons suivantes :

- les mesures sont effectuées le plus souvent en des endroits inaccessibles;
- le dispositif automatique d'auscultation permet des lectures plus fréquentes lors d'événements dangereux (crues, orages, séismes), sans augmentation de coût;
- il réduit le travail et le personnel;
- il réduit la durée de mesure;
- en cas de lectures douteuses ou de résultats alarmants, on peut refaire immédiatement les mesures autant de fois que cela est nécessaire;
- il réduit le temps entre la mesure et son interprétation;
- il diminue les erreurs dans la collecte et le traitement des données;
- il fournit des données lors d'hivers rigoureux ou d'orages violents;
- il permet l'évaluation de la stabilité du barrage à tout moment et également en temps réel;
- il permet de constituer un dispositif d'alerte automatique. L'alerte automatique, dont plusieurs niveaux sont généralement considérés, est utile, mais elle n'est destinée qu'au personnel responsable de la sécurité et non au public très sensible vis-à-vis des barrages de stériles.

7. DATA PROCESSING AND EVALUATION

The success of the tailings dam monitoring, upon which its construction, operation and stability relies, depends on the reliability of data obtained from the instruments as well as on the processing and evaluation of the data. Data from instruments and from visual inspection are only as useful as the capacity of the staff to interpret them correctly and rapidly and to be able to respond accordingly. While manually read standpipe piezometers are simple and reliable, there is much to be said for using electrical transducers so that readings, together with those from other instruments installed in the tailings dam, can be recorded in a central instrument house. Here the readings can be studied and analysed.

It is recommended that the interpretation should be carried out by a small specialized group under the guidance of an engineer with a deep knowledge of tailings dams and instrumentation, and well acquainted with the specific dam project. The staff must be able to devote enough time to fully evaluate the data and make recommendations about the safe operation of dam construction. It is to be expected that, with a large tailings dam, instruments will be read remotely, possibly automatically and processed and stored by computers, and presented graphically. Automatic acquisition and data processing is not only more economical, but for a large tailings dam, it is indispensable because :

- the measurements are carried out mostly in inaccessible places;
- the automated monitoring system allows more frequent readings during dangerous events (floods, storms, earthquake) and this without cost increase;
- it reduces labour and staff;
- it reduces measuring time;
- in case of doubtful readings or alarming results, the readings can immediately be repeated, as many times as necessary;
- it reduces the time between measuring and interpreting;
- it diminishes errors in data collection and reduction;
- it provides data under severe winter or storm conditions;
- it enables evaluation of the dam integrity at any moment and also in real time;
- it provides automatic hazard warning. Automated warning is useful, and several warning levels are normally considered, but it must be given only to the responsible staff and not to the public, which is very sensitive towards tailings dams.

On doit toutefois souligner que le contrôle automatique ne doit pas réduire la surveillance visuelle journalière. Les appareils de mesure ne donnent de renseignements que sur les zones où ils sont situés. La surveillance visuelle permet de déceler des anomalies dans des zones non équipées d'appareils, et fournit une information générale continue pour l'ensemble de l'ouvrage. Cependant, les informations fournies par les inspections visuelles sont moins précises que celles données par les appareils. Aussi, les appareils de mesure et les inspections visuelles se complètent-ils mutuellement pour donner une image complète du comportement et de la sécurité du barrage de stériles.

De même, l'ordinateur peut être d'une grande aide, mais ne peut remplacer l'ingénieur pour l'interprétation des données.

Comparativement aux barrages en terre, la surveillance visuelle des barrages de stériles s'avère beaucoup plus nécessaire, du fait que des phénomènes dangereux, en particulier l'érosion de surface et l'érosion interne, peuvent s'y développer beaucoup plus rapidement. A la différence des barrages en terre, l'exploitation des barrages de stériles n'est pas de toute tranquillité. Au contraire, il s'agit d'un processus continu de construction, mettant en jeu des matériaux susceptibles d'une forte érosion. Le déplacement continu du front de déversement des stériles, la manœuvre des vannes et le changement de place des conduites s'accompagnent très souvent de fuites et de dégâts par érosion. En très peu de temps, ces fuites peuvent causer un entraînement et un écoulement de boues de stériles vers le pied du talus. Si l'on ne détecte pas à temps le phénomène, il y a risque de dégâts sérieux. Pour ces raisons, une surveillance visuelle sera effectuée chaque jour, ou à une fréquence appropriée, par le maître d'œuvre et poursuivie sans interruption par l'exploitant.

Si l'on observe des anomalies, des mesures supplémentaires peuvent être nécessaires. La fréquence des mesures et des observations dépendra de l'importance de l'anomalie, la surveillance se poursuivant jusqu'à ce que l'anomalie disparaisse et le phénomène soit expliqué.

Une documentation photographique sur un comportement anormal du barrage ou sur sa fissuration est très utile. Si possible, l'analyse du processus de dégradation fera appel à une caméra vidéo.

Il est recommandé d'adopter deux types différents de mesure pour le contrôle des paramètres qui sont d'une importance capitale pour la sécurité du barrage.

L'auscultation des barrages de stériles sera conçue suivant les règles et principes mentionnés ci-dessus. Cependant, l'auscultation ne peut faire l'objet d'une normalisation. Elle doit être élaborée compte tenu des caractéristiques spécifiques de l'ouvrage, dans chaque cas particulier. Il importera également que le projeteur conçoive un dispositif d'auscultation fiable et, en même temps, économiquement justifié, constitué d'appareils appropriés, et établisse un programme de mesures très efficace.

It should be stressed however that automatic control should not reduce daily visual inspection. The instruments only give information about the areas where they are located, but inspections can reveal anomalies where there are no instruments, and can provide general continuous overall information for the entire structure. However visual inspection is not as precise as the data from the instruments: instrument measurements and the visual inspections can be said to supplement each other and give a full picture of the tailings dam behaviour.

Similarly computers can assist significantly, but cannot substitute for the interpretation of data by the engineer.

Visual control at tailings dams, compared with earthfill dams, is much more necessary because the dangerous processes, especially surface and internal erosion, can develop much more rapidly. Unlike earthfill dams, tailings dam operation is not a calm process. On the contrary, this is a continuous construction process, involving sensitive highly erodable material. The continuous moving of the spigotting front, the operating of the valves and the shifting of the pipes is accompanied by very frequent leaks which can cause erosion damages. In a very short time such leaks can cause washing away and flow of tailings slurry down the slope, and if not detected in time, can cause serious damage. For these reasons, visual control must be carried out daily or frequently enough by the engineer and continuously by the operators.

In case of observed anomalies, supplementary irregular measurements may be required. The increased frequency of measurements and observations should correspond to the importance of the anomaly and continue until it disappears and the phenomenon is explained.

Photographic documentation of abnormal dam behaviour or failures is very useful. When possible, the failure process is to be documented by video camera.

It is recommended that two different types of measurements are applied for monitoring factors which are of vital importance for the dam safety.

Instrumentation and monitoring of tailings dams should be based on the rules and principles presented above. However, instrumentation and monitoring cannot be an object of standardization. They must be elaborated for the specific project features in each individual case. The designer must work out the most reliable and economically justified monitoring system using the most suitable instruments, and the most efficient monitoring programme.

8. BIBLIOGRAPIE/BIBLIOGRAPHY

- ABADJIEV, C.B. (1991), Instrumentation and Monitoring of Spigotted Tailings Dams. *Proc. of the International Colloquium « Hydomechanisation 7 »*, Varna, 4-6 September 1991.
- DiBIAGIO, E. (1974), Contribution to discussion. *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering*, Butterworths, London, pp. 565-6.
- DiBIAGIO, E., MYRVOLL, F., VALSTAD, T. and HANSTEEN, H. (1982), Field instrumentation, observations and performance evaluation of the Svartevann dam. *Trans. 14th Int. Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 789-826.*
- DiBIAGIO, E. and MYRVOLL, F. (1985), Instrumentation techniques and equipment used to monitor the performance of Norwegian embankment dams. *Trans. 15th Int. Congress on Large Dams, Lausanne, vol. 1, pp. 1169-1197.*
- DUNNICLIFF J. (1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. *John Wiley & Sons.*
- HANNA T. H. (1985), Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. *Trans Tech Publications.*
- PENMAN A.D.M. (1982), Instrumentation requirements for earth and rockfill dams. *Geotechnical Problems and Practice of Dam Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 183-209.*
- ICOLD (1982) Bulletin 41, Automated observation for the safety control of dams/ L'automatisation dans le contrôle de la sécurité des barrages. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.*
- ICOLD (1985) 15th Int. Congress on Large Dams, Question 56, Dams and Foundation Monitoring/Auscultation des barrages et de leurs fondations. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.*
- ICOLD (1985) Bulletin 60, Dam Monitoring - General Considerations/Auscultation des barrages - Considérations générales. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.*
- ICOLD (1989) Bulletin 68, Monitoring of Dams and their Foundations, State-of-the-Art/Auscultation des barrages et de leurs fondations - Technique actuelle. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.*
- ICOLD (1992) Bulletin 87, Improvement of Existing Dam Monitoring/Amélioration de l'auscultation des barrages existants. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris*
- ICOLD (1994) Bulletin 97, Tailings Dams : Design of Drainage/Barrages de stériles : Conception du drainage. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris*
- ICOLD (1995) Final Draft, Tailings Dams : A Guide to their Design, Construction, Use and Rehabilitation/Barrages de stériles : Conception, construction, exploitation et réhabilitation. *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris*
- US Bureau of Reclamation (1987) Embankment Dam Instrumentation Manual. *US Department of the Interior, Washington.*

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : juillet 1996
N° 18293
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>