

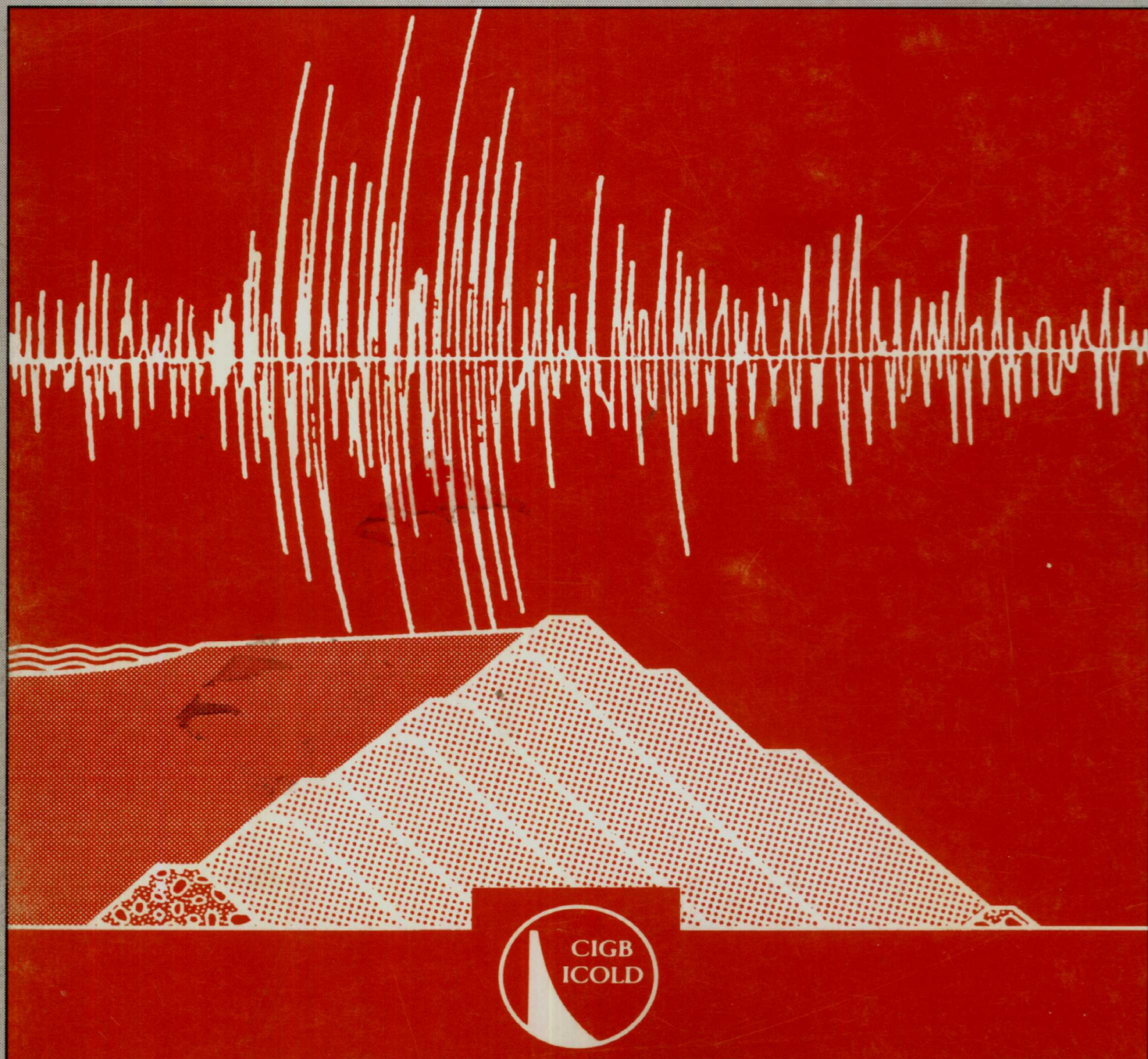
TAILINGS DAMS AND SEISMICITY

Review and recommendations

BARRAGES DE STERILES ET SEISMICITE

Synthèse et recommandations

Bulletin 98



1995

Original text in English

French translation finalized by Y. Le May.

Texte original en anglais

Traduction en français mise au point par Y. Le May.

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

TAILINGS DAMS AND SEISMICITY

Review and recommendations

BARRAGES DE STERILES ET SEISMICITE

Synthèse et recommandations

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

**COMMITTEE ON MINE AND INDUSTRIAL TAILINGS DAMS
COMITÉ DES BARRAGES DE STÉRILES MINIERES 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. ÉVALUATION DE LA SISMICITÉ
3. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE
4. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES BARRAGES DE STÉRILES
5. CALCUL DE STABILITÉ SISMIQUE
6. MESURES CORRECTIVES POUR L'AMÉLIORATION DE LA SÉCURITÉ DE BARRAGES EXISTANTS
7. RÉSUMÉ
8. RÉFÉRENCES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. SEISMICITY ASSESSMENT
3. GEOTECHNICAL EVALUATION
4. DESIGN AND CONSTRUCTION OF TAILINGS DAM
5. SEISMIC STABILITY ANALYSIS
6. REMEDIAL MEASURES FOR IMPROVING SAFETY OF EXISTING FACILITY
7. SUMMARY
8. REFERENCES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	6
1. INTRODUCTION	8
1.1. Généralités	8
1.2. Stabilité sismique	8
1.3. Comportement sismique des barrages de stériles et des barrages en remblai classiques	10
1.3.1. Comportement des barrages de stériles	10
1.3.2. Comportement des barrages en remblai	12
2. ÉVALUATION DE LA SISMICITÉ	20
2.1. Séisme de base d'exploitation	20
2.2. Séisme maximal de dimensionnement	20
3. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	24
3.1. Reconnaissances sur le site	24
3.2. Études en laboratoire	28
4. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES BARRAGES DE STÉRILES	32
5. CALCUL DE STABILITÉ SISMIQUE	36
5.1. Calcul de stabilité statique utilisant le concept de l'équilibre limite et la résistance en régime permanent	36
5.2. Calcul de stabilité sismique simplifié	38
5.3. Calcul de stabilité sismique par la méthode des éléments finis	38
6. MESURES CORRECTIVES POUR L'AMÉLIORATION DE LA SÉCURITÉ DE BARRAGES EXISTANTS	44
6.1. Construction d'un nouveau barrage	44
6.2. Renforcement du barrage existant	44
6.3. Protection de la zone aval	48
7. RÉSUMÉ	50
8. RÉFÉRENCES	52

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	7
1. INTRODUCTION	9
1.1. General	9
1.2. Seismic Stability Considerations	9
1.3. Seismic Performance of Tailings Dams and Embankment Dams	11
1.3.1. Performance of Tailings Dams	11
1.3.2. Performance of Embankment Dams	13
2. SEISMICITY ASSESSMENT	21
2.1. Operating Basis Earthquake (OBE)	21
2.2. Maximum Design Earthquake (MDE)	21
3. GEOTECHNICAL EVALUATION	25
3.1. Field Investigations	25
3.2. Laboratory Investigations	29
4. DESIGN AND CONSTRUCTION OF TAILINGS DAM	33
5. SEISMIC STABILITY ANALYSIS	37
5.1. Static Limit-Equilibrium Stability Analysis using Steady-State Strength	37
5.2. Simplified Seismic Stability Analysis	39
5.3. Finite Element Seismic Stability Analysis	39
6. REMEDIAL MEASURES FOR IMPROVING SAFETY OF EXISTING FACILITY	45
6.1. Replacement by New Dam	45
6.2. Improvement of the Existing Dam	45
6.3. Protection of Downstream Area	49
7. SUMMARY	51
8. REFERENCES	52

AVANT-PROPOS

On ne connaît pas de rupture de barrage en remblai conçu et construit selon les techniques modernes, sous l'effet d'un séisme. Cette constatation fut confirmée lors du symposium sur « les séismes et les barrages », tenu à Beijing à l'occasion de la 55^e Réunion Exécutive de la CIGB en 1987. Yan Kai, Président du Comité Chinois des Grands Barrages, indiqua qu'en Chine on avait enregistré 3 270 séismes de magnitude supérieure à 4,7 et 133 de magnitude supérieure à 7. Depuis 30 ans, si plusieurs barrages ont subi des dégâts importants, il n'y a eu, par contre, aucune rupture. Commentant un tableau des effets des séismes sur les barrages, le Professeur Serafim a également montré qu'à l'échelle mondiale, aucun barrage réalisé selon les techniques modernes ne s'était rompu.

Par contre, on a constaté un grand nombre de ruptures de barrages de stériles lors de séismes, les boues ainsi lâchées provoquant des dégâts importants avec pertes élevées de vies humaines. Un inventaire mondial récent établi par le Comité des Grands Barrages des États-Unis a recensé 185 incidents de barrages constitués de stériles de diverses provenances. Cet inventaire souligne la grande vulnérabilité de ces barrages aux séismes, la faiblesse de ceux construits par la méthode amont étant principalement l'instabilité du talus sous l'effet des sollicitations sismiques.

Pour répondre au besoin évident d'éclaircissements sur la conception sismique des barrages de stériles, le présent Bulletin indique les récents progrès réalisés dans la résistance de ces ouvrages aux charges sismiques. Le traitement de barrages existants pour améliorer leur résistance aux séismes est également une question importante. Le Bulletin présente donc les mesures correctives destinées à renforcer la sécurité de barrages existants. Il donne également une bibliographie très complète permettant aux lecteurs de consulter les documents utilisés et de connaître plus en détail les diverses méthodes présentées.

Nous remercions le Comité Canadien des Grands Barrages pour cette contribution aux travaux du Comité des Barrages de Stériles Miniers et Industriels, et particulièrement Earle J. Klohn et Robert C. Lo qui ont préparé le premier projet de rapport.

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

FOREWORD

No embankment dam, designed and built to modern standards, has failed as a result of earthquake shaking. This was borne out during the one-day symposium on earthquakes and dams held in Beijing at the time of the 55th Executive Meeting of ICOLD in 1987. Chairman of CHINCOLD, Yan Kai, said that in China, 3 270 earthquakes of magnitude exceeding 4.7 had occurred in recorded history; 133 exceeding 7 M. During the past 30 years, while several dams had been seriously damaged, none had failed. In a Table showing the effects of earthquakes on dams, Professor Serafim also showed that worldwide, no modern, well built embankment dam has failed.

On the other hand, very many tailings dams have failed during earthquake, releasing liquefied lagoons of tailings that have caused serious damage and loss of life. A recent USCOLD compilation of tailings dam incidents has listed 185 incidents collected worldwide, covering tailings from a wide variety of materials. This has shown that tailings dams are very susceptible to earthquake damage and that those built by the upstream method have failed mainly due to slope instability and earthquake.

There is clearly a need for advice on seismic design for tailings dams and this Bulletin has been prepared to show the current state-of-the-art for the design of new dams to resist earthquake forces. Of equal importance is the question of treating existing dams to make them better able to withstand earthquake shaking and this Bulletin gives remedial measures for improving the safety of existing impoundments. It also gives a very comprehensive collection of references so that the reader can go back to original sources and study various methods in greater detail.

We are grateful to CANCOLD for this contribution to the work of the Committee on Mine and Industrial Tailings Dams and wish to thank particularly Earle J. Klohn and Robert C. Lo who prepared the original draft.

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

1. INTRODUCTION

1.1. GÉNÉRALITÉS

Les barrages de stériles associés aux exploitations minières modernes sont des ouvrages hydrauliques importants dont le volume stocké peut atteindre quelques milliards de tonnes de résidus avec des quantités importantes d'eau surnageant, destinée à être reprise dans la centrale de broyage. Les conséquences de la rupture d'un tel ouvrage risquent d'être très importantes en vies humaines, impacts sur l'environnement, pertes économiques (CIGB, 1977). Les ruptures récentes en Italie (Berti *et al.*, 1988), au Chili (Dobry et Alvarez, 1967; Troncoso, 1989) et au Japon (Marcuson *et al.*, 1979; Ishihara, 1984) soulignent le fait que, faute d'une conception et d'une construction assurant la stabilité lors des crues et des séismes, et d'une surveillance en exploitation assurant que les critères de projet sont à tout moment respectés, il y a danger d'accident ou de rupture, de tels risques étant trop souvent constatés.

Le présent Bulletin concerne les aspects sismiques des projets de barrage de stériles et de l'évaluation de la sécurité des barrages existants. Son but est de souligner les aspects concernant la question de la stabilité sismique. Il complète ainsi le Bulletin 45 « Manuel des barrages et des dépôts des stériles » (CIGB, 1982). Pour éviter le double emploi, il y a de fréquents renvois aux autres publications de la CIGB et aux documents récents consacrés à ce sujet.

1.2. STABILITÉ SISMIQUE

Les paramètres influençant la stabilité sismique d'un barrage de stériles sont notamment :

- les caractéristiques des séismes éventuels affectant le site (magnitude, distance, mouvements du sol),
- les caractéristiques géotechniques de la fondation et des matériaux de remblai,
- la conception et la construction du barrage,
- les risques d'inondation et de dommages à l'environnement, dans les zones aval, dans le cas d'un incident ou d'une rupture du barrage, et les critères sismiques appropriés de projet;
- le choix de la méthode de calcul de stabilité sismique,
- les différentes actions correctives possibles, destinées à améliorer la résistance sismique d'un barrage existant et/ou à limiter les conséquences néfastes à l'aval pouvant résulter de son comportement défectueux.

1. INTRODUCTION

1.1. GENERAL

Tailings dams constructed by modern mines are important major hydraulic structures impounding up to a few billion tonnes of tailings and substantial quantities of supernatant water for re-use in the mills. Failure of such a structure could have severe consequences in terms of loss of life, environmental damage, and economic loss (ICOLD 1977). Recent tailings dam failures in Italy (Berti *et al.*, 1988), in Chile (Dobry and Alvarez 1967, Troncoso 1989), and in Japan (Marcuson *et al.*, 1979, Ishihara 1984) serve as reminders that unless these structures are designed and constructed properly to safely withstand appropriate flood and earthquake events, and operated under close surveillance to ensure that design intents are maintained at all times, accidents and failures will and do occur.

This bulletin covers seismic aspects of the design of new tailings dams and safety evaluation of existing ones. The purpose of the bulletin is to highlight those aspects of tailings dam design pertaining to the issue of seismic stability. It thus supplements the Manual on Tailings Dams and Dumps - Bull. 45 (ICOLD 1982). To conserve space and minimize duplication, extensive references are made to relevant ICOLD publications and recent literature.

1.2. SEISMIC STABILITY CONSIDERATIONS

Key seismic stability considerations include :

- the magnitude and distance of design earthquakes and the design ground motions appropriate for the tailings storage site;
- the geotechnical properties of the tailings dam foundation and dam fill materials;
- the design and construction of the dam;
- the potential inundation of and/or environmental damages to downstream areas in an event of dam incident or failure, and appropriate seismic design criteria;
- the selection of an appropriate method of seismic stability analysis; and
- the range of remedial measures available for enhancing the seismic resistance of an existing tailings facility and/or for mitigating potentially detrimental downstream effects that could result from its unsatisfactory performance.

1.3. COMPORTEMENT SISMIQUE DES BARRAGES DE STÉRILES ET DES BARRAGES EN REMBLAI CLASSIQUES

L'importance d'un séisme se définit par son intensité et sa durée; généralement, ces deux paramètres augmentent en fonction de la magnitude. Les conséquences pour le site du projet sont fonction de son éloignement du séisme. En effet, plus la distance de l'épicentre est faible, plus les conséquences pour le projet sont importantes. En outre, le spectre des fréquences du mouvement sismique joue un rôle important dans le comportement du barrage. Si la fréquence dominante correspond à la fréquence naturelle du barrage avec sa fondation, les mouvements risquent d'être amplifiés. Normalement, on tient compte des caractéristiques des mouvements dans le calcul sismique (voir le chapitre 5 ci-dessous).

Les comportements sismiques des barrages de stériles construits par la méthode amont et des barrages en remblai classiques ont été mis en corrélation avec les charges sismiques auxquelles ces ouvrages ont été soumis. Ces corrélations sont utiles dans les études sismiques préliminaires et sont examinées ci-après.

1.3.1. Comportement des barrages de stériles

Des relations empiriques, basées sur des événements réels et visant à corréler certaines caractéristiques du séisme (éloignement, magnitude) avec les effets néfastes sur les barrages de stériles construits par la méthode « amont » (voir Fig. 1) furent proposées par Conlin (1987) et mises à jour par Lo *et al.* (1988). USCOLD (1993) fournit un résumé succinct des incidents de barrages de stériles, signalés dans la littérature. Comme l'indiquent ces données et comme l'illustre la Fig. 1, un ouvrage de stockage des stériles, qui n'est pas en exploitation, a un meilleur comportement qu'un ouvrage en exploitation. Cela est dû au fait que le premier type ne présente pas de retenue d'eau surnageant, ou n'a qu'une retenue insignifiante, ce qui réduit le risque de rupture du barrage et minimise les dégâts à l'aval en cas de rupture. D'autres facteurs interviennent : une position basse de la ligne de saturation à l'intérieur du barrage, un niveau élevé de consolidation des dépôts amont de stériles, une augmentation de la résistance au cisaillement des matériaux du barrage dans le temps. Lorsqu'on maintient une submersion pour maîtriser les problèmes de drainage de roche acide associés aux dépôts de stériles de type acide, une retenue d'eau surnageant existe à perpétuité. Dans ce cas, il y a une amélioration moins importante de la résistance sismique de l'ouvrage de stockage, après arrêt de son exploitation.

Plusieurs facteurs influençant le comportement des barrages de stériles ne sont pas pris en compte explicitement dans les diagrammes du genre de celui de la Fig. 1, tels que : pentes des talus, position de la ligne de saturation dans le barrage, largeur de la plage séparant le barrage de la retenue, caractéristiques et consolidation de la fraction sableuse (Vick, 1983), spectre des fréquences du séisme, conditions locales. Par exemple, les barrages de stériles construits par la méthode « amont » en Chine présentent généralement une pente du talus aval beaucoup plus douce ($1 V/4 H$ ou moins) que ceux des autres pays. Pour ces raisons, les points des graphiques, tels que ceux de la Fig. 1 (Conlin, 1987), sont très dispersés.

1.3. SEISMIC PERFORMANCE OF TAILINGS DAMS AND EMBANKMENT DAMS

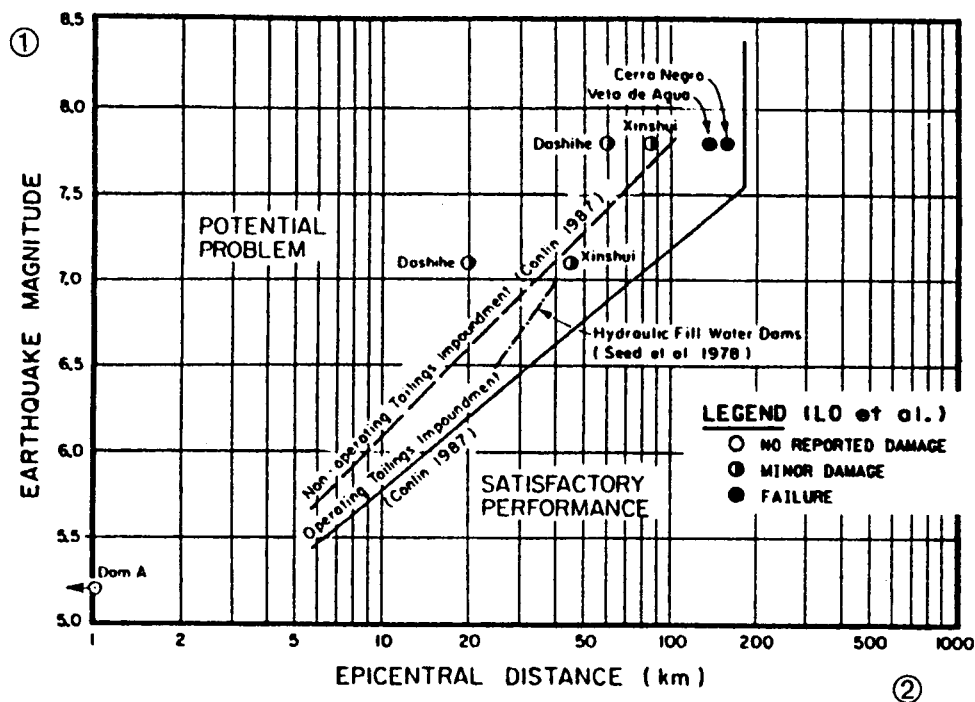
The severity of an earthquake is reflected by the intensity and duration of shaking, both of which generally increase as the magnitude of the earthquake increases. The impact of the earthquake on a project site is directly related to its distance from the site. The closer the epicentral distance, the greater the impact. In addition, the frequency content of the earthquake motions plays an important role in affecting dam performance. The motions may be amplified stronger if the predominant frequency coincides with the natural frequency of the dam and its foundation. Due consideration of these motion characteristics is usually included in a proper seismic stability analysis as outlined in Section 5.

Seismic performances of upstream tailings dams and embankment dams have been correlated with earthquake loadings to which these dams have been subjected. These correlations are useful in preliminary seismic assessments and are reviewed below.

1.3.1. Performance of Tailings Dams

Empirical relationships, based on case histories relating magnitude and distance of earthquakes to their damaging effect on upstream tailings dams (see Fig. 1), were presented by Conlin (1987) and updated by Lo *et al.* (1988). USCOLD (1993) provides a succinct summary of tailings dam incidents reported in the literature. As indicated in these databases and illustrated in Fig. 1, a non-operating tailings impoundment fares better than an operating one. This is usually attributed to the fact that a non-operating impoundment involves none or only a nominal-sized supernatant pond. The presence of a small pond or the total absence of a pond not only reduces the risk of dam failure, but also minimizes the downstream damages when a failure does occur. Other contributing factors include: lower phreatic surface within the dam, higher degree of consolidation for upstream tailings deposits, and potential increase of the shearing strength of dam materials due to ageing. When permanent submergence is used to control acid rock drainage problems associated with acid-generating tailings deposits, a supernatant pond is maintained in perpetuity. In such an instance, the improvement in the seismic resistance of the impoundment after its decommissioning is expected to be less due to the presence of a permanent pond.

Many factors affecting the seismic behaviour of a tailings dam are not explicitly considered in plots like Fig. 1. These include such factors as the flatness of the dam slopes, the position of the saturation level within the dam, the width of tailings beach separating the dam and supernatant water upstream, the characteristics and degree of consolidation of the tailings sands (Vick 1983), the frequency content of the earthquake motions, and local site effects. For example, Chinese upstream tailings dams usually have much flatter downstream slopes, typically 1V on 4H or flatter, than those in other countries. Therefore, there is considerable scattering of data points in plots like Fig. 1 (Conlin 1987).



Il y a peu d'information sur les modes de rupture des barrages mentionnés sur la Fig. 1. Du fait que les ruptures dues aux séismes sont en général soudaines, les observations au cours du processus de rupture sont pratiquement inexistantes. Il est nécessaire de mieux connaître les divers modes de rupture des barrages de stériles. Cela peut être acquis progressivement dans le futur en procédant à des recherches après les séismes et à des études approfondies immédiatement après une rupture ou un incident de barrage d'origine sismique.

1.3.2. Comportement des barrages en remblai

De nombreux barrages en remblai servent à stocker des stériles. En outre, les barrages de stériles construits par les méthodes aval ou de l'axe central présentent plusieurs caractéristiques identiques à celles des barrages en remblai. Ainsi, des informations sur le comportement de ceux-ci constituent des données complémentaires précieuses. Cependant, lors de l'utilisation de ces données, il ne faut pas oublier les différences existant entre les barrages en remblai classiques et les barrages de stériles, dans les domaines de la conception et de la construction, ainsi qu'il est indiqué dans le chapitre 4.

Les effets d'un séisme sur un barrage en remblai sont : tassements, déplacements horizontaux, fissuration (longitudinale et/ou transversale), surpressions interstitielles, « seiches » de l'eau surnageant et/ou des stériles non consolidés, affaissement et rupture des talus, érosion interne, augmentation des percolations, brèches dans le barrage ou les rives de la retenue (dans les cas extrêmes).

Fig. 1

Susceptibility of upstream tailings dams to earthquake-induced damage
 (after Conlin 1987, Lo et al. 1988)
Barrage de stériles construits par la méthode amont - Sensibilité aux séismes
 (d'après Conlin, 1987; Lo et al., 1988)

- | | |
|---|---|
| (1) Earthquake magnitude | (1) <i>Magnitude du séisme</i> |
| (2) Epicentral distance (km) | (2) <i>Distance à l'épicentre (km)</i> |
| Potential problem | <i>Désordres possibles</i> |
| Satisfactory performance | <i>Comportement satisfaisant</i> |
| ○ No reported damage | ○ <i>Aucun désordre</i> |
| ● Minor damage | ● <i>Désordres sans gravité</i> |
| ● Failure | ● <i>Rupture</i> |
| --- Non-operating tailings impoundment (Conlin, 1987) | --- <i>Barrages de stériles non exploités (Conlin, 1987)</i> |
| — Operating tailings impoundment (Conlin, 1987) | — <i>Barrages de stériles en exploitation (Conlin, 1987)</i> |
| ---- Hydraulic fill water dams (Seed et al. 1978) | ---- <i>Barrages-réservoirs construits par remblayage hydraulique (Seed et al., 1978)</i> |

There is very little information on the modes of failure of the dams shown in Fig. 1. Because seismic failures usually occur without much warning, critical observations during the failure process are practically non-existent. Improved understanding of various tailings-dam failure modes including their processes are needed. This improvement can only be gained gradually in the future by carrying out post-earthquake investigation and careful research immediately after a seismic dam failure or incident.

1.3.2. Performance of Embankment Dams

Many embankment dams are used to retain tailings. Moreover, tailings dams constructed by downstream and centreline methods share many characteristics with embankment dams. Thus, information on the seismic performance of embankment dams provides an additional valuable database. However, the differences in design and construction control between conventional embankment dams and tailings dams, as discussed in Section 4, should be kept in mind when using this database.

Seismic behaviour of embankment dams include : settlement, horizontal movement, cracking (longitudinal and/or transverse), pore pressure build-up, " seiches " of supernatant water and/or unconsolidated tailings, slope slumping, slope failure (including flow slide), internal erosion, seepage increases, and reservoir or impoundment breaching in the extreme cases.

Les déplacements en crête sont les témoins de la déformation du barrage (compression, étalement latéral, déplacement des talus) provoquée par le séisme. Bureau *et al.* (1985) ont étudié le comportement sismique des barrages en terre et en enrochement, et notamment les déplacements en crête (tassements, déplacements horizontaux). Ils ont proposé un Indice de Sévérité Sismique (ESI) traduisant l'influence de l'intensité et de la durée du séisme; cet indice s'écrit :

$$ESI = A (M - 4,5)^3$$

A = accélération maximale du sol au site du barrage, exprimée sous la forme d'une fraction de l'accélération g;

M = magnitude du séisme.

Ces auteurs ont également proposé une relation empirique reliant cet indice ESI au tassement relatif en crête (c'est-à-dire, tassement absolu divisé par la hauteur du barrage). Ce graphique est présenté sur la Fig. 2, avec les données supplémentaires apportées par Lo et Klohn (1992). La courbe est obtenue par interpolation sur l'ensemble des points.

La Fig. 3 présente un graphique identique (avec données supplémentaires de Lo et Klohn, 1992) reliant le déplacement horizontal relatif en crête (déplacement horizontal divisé par la hauteur du barrage) à l'indice ESI (tous déplacements vers l'aval et l'amont confondus). Cependant, pour les points de cette Fig., on ne distingue pas les déplacements amont et les déplacements aval.

L'examen des données présentées dans les Fig. 2 et 3 conduit aux réflexions suivantes :

- les déplacements horizontaux sont généralement inférieurs aux tassements, mis à part le cas des barrages de Miboro (Japon) et Matahina (Nouvelle-Zélande) où ils ont dépassé les tassements;
- si l'ampleur des déplacements vers l'aval est généralement plus grande que celle des déplacements vers l'amont, des cas contraires peuvent se présenter;
- les points de la Fig. 3 correspondant aux déplacements horizontaux semblent plus dispersés que ceux correspondant aux tassements de la Fig. 2.

De même que sur la Fig. 1, les points des Fig. 2 et 3 présentent une grande dispersion. Cette dispersion des points relatifs à des phénomènes observés traduit les différences dans les conditions de fondation, les matériaux de remblai des barrages, les détails de projet et de construction, les caractéristiques des séismes, etc. En vue d'apprécier les particularités de chaque cas, on devra consulter les références donnant des détails sur l'ouvrage considéré.

Crest movement of embankment dams during earthquakes reflects dam deformation associated with compression, lateral spreading and slope movements induced by earthquakes. Bureau *et al.* (1985) reviewed seismic performance of earth and rockfill dams including the crest movement (settlement and horizontal movement). They introduced an Earthquake Severity Index (ESI), which reflects the influence of both the intensity and duration of the causative earthquake, and is defined as :

$$ESI = A (M - 4.5)^3$$

where :

A = peak ground acceleration at the damsite, expressed as a fraction of the gravitational acceleration;

M = earthquake magnitude.

Bureau *et al.* further showed an empirical relationship between the index, ESI, and the crest settlement expressed as a relative settlement ratio (crest settlement divided by dam height). This correlation plot, updated with data from Lo and Klohn (1992) is reproduced in Fig. 2. The solid line represents the interpolated trend line through all the data points.

Fig. 3 presents a similar plot, also updated by data from Lo and Klohn (1992), correlating the horizontal relative crest movement (horizontal movement divided by dam height) with the Earthquake Severity Index, ESI. Both upstream and downstream horizontal movement data are included in the plot. However, these data points are not separately designated as upstream or downstream movement.

A review of original data presented in Fig. 2 and 3 suggests the following. First, the horizontal movement is generally only a fraction of the settlement with the following two exceptions. At Miboro Dam in Japan and Matahina Dam in New Zealand the horizontal movement value exceeds the settlement value. Secondly, although the downstream horizontal movement value is generally greater than the upstream horizontal movement value, cases with the reverse trend are not infrequent. Thirdly, the data for the horizontal movements in Fig. 3 seems to be more scattered than those for the settlement in Fig. 2.

Similar to Fig. 1, there are considerable scattering of data points in Fig. 2 and 3. This scatter of case-history data points reflects differences in the foundation conditions, dam fill materials, design and construction details, and earthquake characteristics, etc. associated with each case. References containing more detailed information about each case should be consulted in order to appreciate relevant features involved in the individual case.

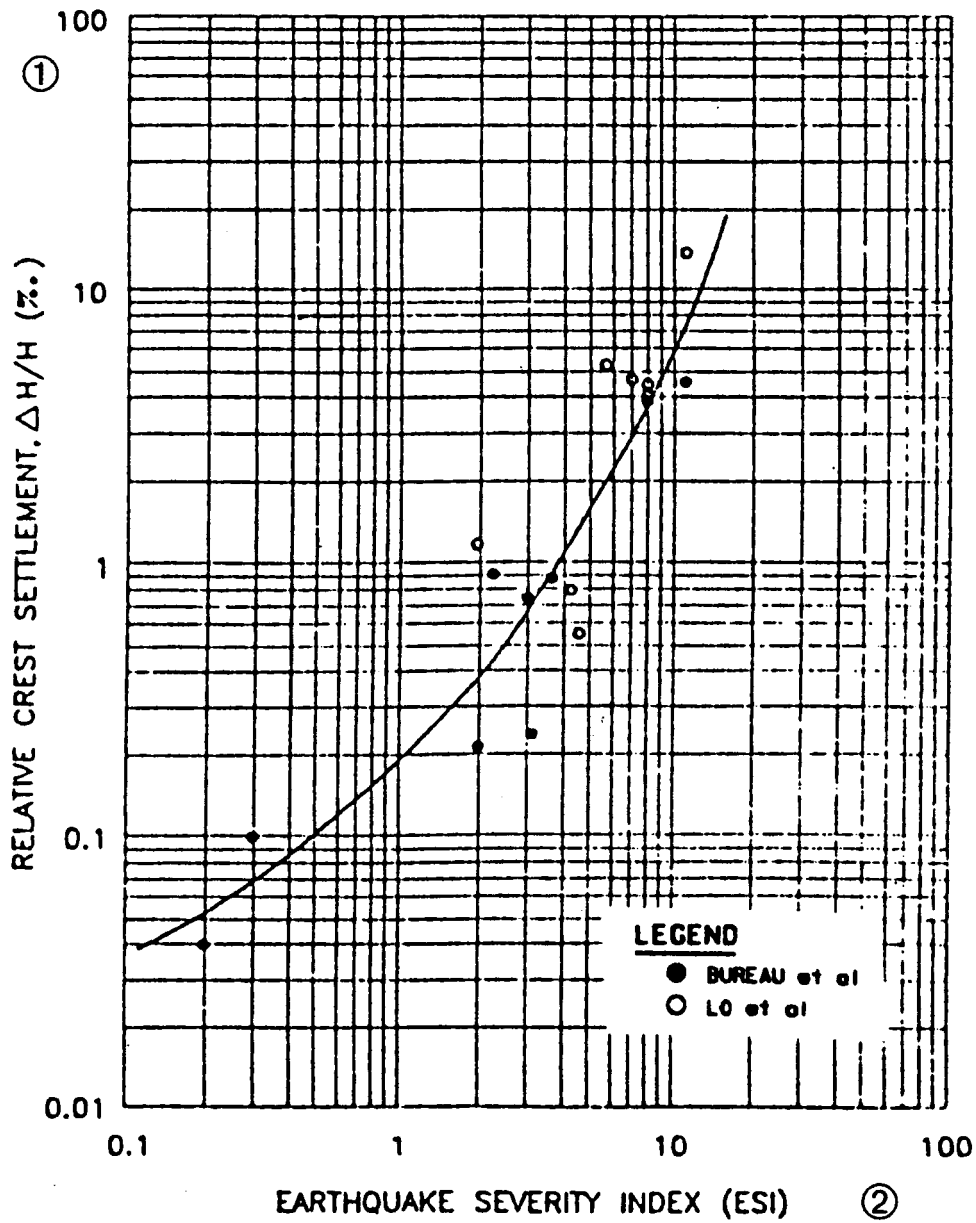


Fig. 2

Empirical relationship between crest settlement and Earthquake Severity Index - Embankment dams
(after Bureau *et al.* 1985, Lo and Klohn 1992)

*Barrages en remblai - Relation empirique entre les tassements en crête et l'indice de sévérité sismique
(d'après Bureau et al., 1985; Lo et Klohn, 1992)*

(1) Relative crest settlement $\Delta H/H$ (‰)
(2) Earthquake Severity Index (ESI)

(1) *Tassement relatif en crête $\Delta H/H$ (‰)*
(2) *Indice de sévérité sismique*

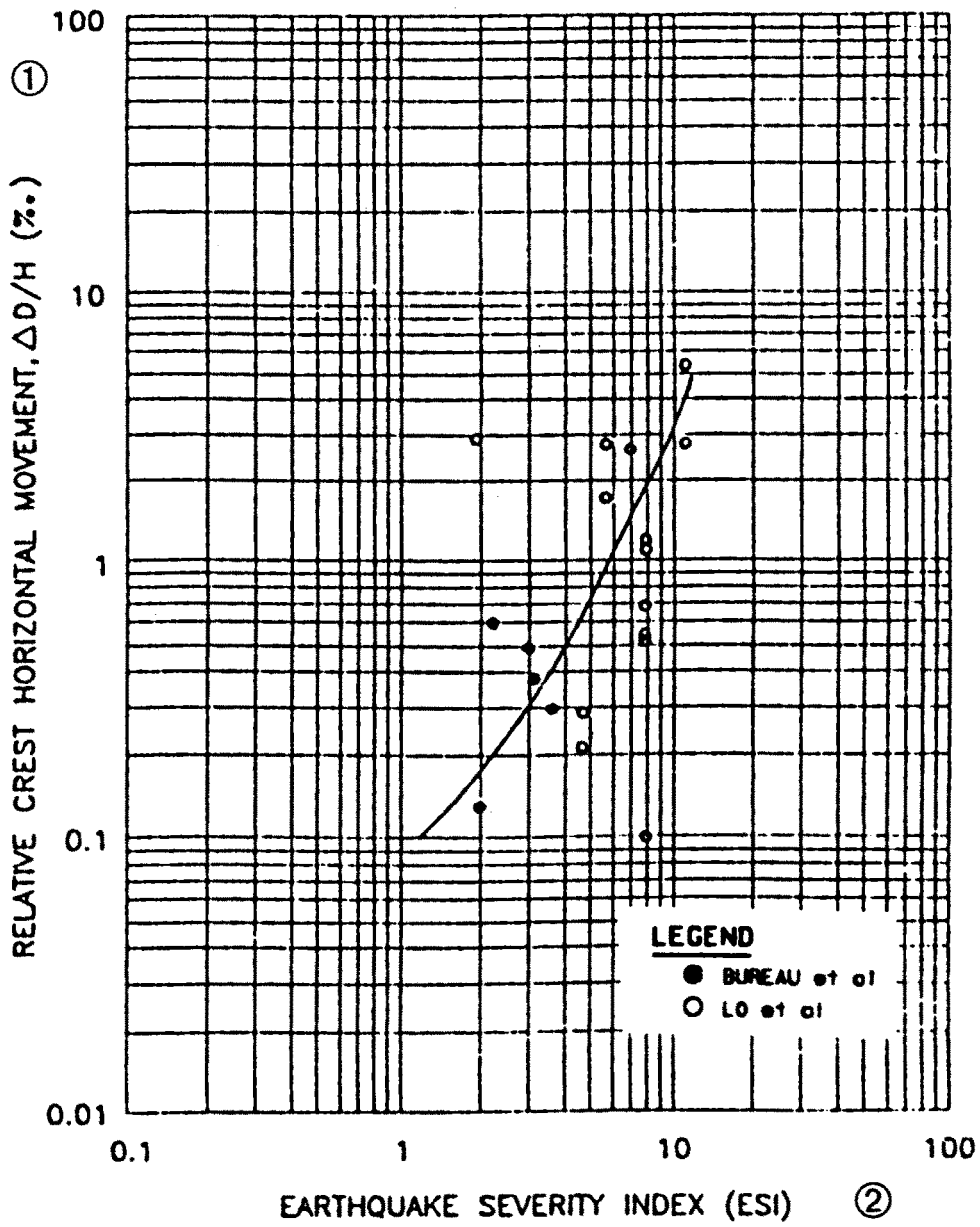


Fig. 3

Empirical relationship between crest horizontal movement and Earthquake Severity Index -
Embankment dams (after Bureau *et al.* 1985, Lo and Klohn 1992)

*Barrage en remblai - Relation empirique entre les déplacements horizontaux en crête
et l'indice de sévérité sismique (d'après Bureau et al., 1985; Lo et Klohn, 1992)*

- | | |
|--|--|
| (1) Relative crest horizontal movement $\Delta D/H$
(%) | (1) <i>Déplacement horizontal relatif en crête
$\Delta D/H$ (%)</i> |
| (2) Earthquake Severity Index (ESI) | (2) <i>Indice de sévérité sismique</i> |

2. ÉVALUATION DE LA SISMICITÉ

Trois Bulletins récents publiés par la CIGB, à savoir : « La sismicité et la conception des barrages » (Bulletin 46, 1983); « Les critères de projet des barrages – La philosophie de leur choix » (Bulletin 61, 1988b); « Le choix des paramètres sismiques pour grands barrages - Recommandations » (Bulletin 72, 1989c), traitent de la question du choix des données sismiques pour le projet d'un barrage. Dans le présent chapitre, nous décrivons brièvement les méthodes classiques d'évaluation de la sismicité pour les projets de barrages de stériles grands ou délicats. Généralement, on prend deux niveaux de séisme : « Operating Basis Earthquake » (OBE) – Séisme de Base d'Exploitation – pour le cas de l'exploitation normale du barrage, et « Maximum Design Earthquake » (MDE) – Séisme Maximal de Dimensionnement – pour les cas extrêmes (CIGB, 1989c).

2.1. SÉISME DE BASE D'EXPLOITATION (OBE)

Le choix des caractéristiques du séisme OBE découle d'une évaluation probabiliste du risque sismique, notamment du type proposé par Cornell et McGuire (Cornell, 1968; McGuire, 1976 et 1978). Le niveau de risque sismique varie selon les différents projets; on prend souvent le séisme présentant une probabilité de dépassement de 10 % sur 50 ans, ou une probabilité de dépassement annuelle égale à 1/475. Pour passer du niveau de risque choisi aux mouvements du sol correspondants, on dispose, dans un grand nombre de régions du monde, de cartes de zonage sismique. Un barrage de stériles doit fonctionner normalement après passage du séisme OBE.

2.2. SÉISME MAXIMAL DE DIMENSIONNEMENT (MDE)

Pour ce niveau de séisme, il est admis que le barrage peut subir certaines détériorations, mais sans compromettre sa stabilité, et sans déversement des résidus stockés. Pour les grands barrages, dont la rupture peut avoir de très graves conséquences à l'aval, on prend souvent, pour le séisme MDE, le séisme maximal possible (Maximum Credible Earthquake, MCE). Par ailleurs, on note une tendance, dans certains organismes, à préférer le « séisme d'évaluation de la sécurité » (Safety Evaluation Earthquake, SEE), parfois égal ou inférieur au séisme MCE. Le choix du séisme SEE est basé sur une analyse du risque sismique, qui incorpore le niveau de probabilité et les dégâts. Le choix du séisme MDE est une tâche complexe et mérite le développement qui suit.

Par définition, le séisme maximal possible MCE ne comporte aucune notion de probabilité et son choix repose sur une étude déterministe. Cependant, dans la pratique, ce niveau sismique correspond parfois à un événement de très faible

2. SEISMICITY ASSESSMENT

Three recent ICOLD publications: "Seismicity and Dam Design (Bull. 46, 1983), "Dam Design Criteria – The Philosophy of Their Selection" (Bull. 61, 1988b) and "Selecting Seismic Parameters for Large Dams – Guidelines" (Bull. 72, 1989c) cover comprehensively the subject of selecting appropriate earthquake input for dam design. Suggested procedures in common practice for seismicity assessment of major and/or important tailings dams are briefly outlined in this section. Two levels of design earthquakes are generally considered: the operating basis earthquake (OBE) for normal operations; and the maximum design earthquake (MDE) for extreme conditions (ICOLD 1989c).

2.1. OPERATING BASIS EARTHQUAKE (OBE)

The operating basis earthquake is usually selected using probabilistic seismic hazard evaluation procedures such as the Cornell-McGuire method (Cornell 1968, McGuire 1976 and 1978). The hazard level selected for the OBE varies from project to project but often is chosen as the earthquake which has a 10 % probability of exceedance in a 50-year period, or an annual probability of exceedance of one in 475. Ground motion parameters corresponding to this hazard level are available in the form of seismic zoning maps in many regions of the world. The tailings dam is expected to function in a normal manner after the passage of the operating basis earthquake.

2.2. MAXIMUM DESIGN EARTHQUAKE (MDE)

For the maximum design earthquake level, damage of the dam is acceptable as long as the integrity and stability of the dam is maintained and the release of the impounded tailings is prevented. For major tailings dams, the failure of which could have severe downstream consequences, the maximum credible earthquake (MCE) is usually used as the maximum design earthquake. There is a recent trend for some organizations to use the safety evaluation earthquake (SEE), which could be equal to or less than the MCE. The selection of the SEE is based on some form of seismic risk analysis that incorporates both probability level and damage assessment. The selection of the maximum design earthquake is a complex task and is further discussed following:

By definition, the maximum credible earthquake does not have any probabilistic connotation, and its selection involves a deterministic assessment. However, in practice, this design level earthquake is sometimes associated with earthquakes of

probabilité de dépassement (par exemple, une probabilité de dépassement annuelle de l'ordre de 1/10 000). La probabilité de dépassement annuelle du séisme SEE peut être supérieure selon l'importance du barrage et les conséquences de sa rupture (Seed, 1982). Une évaluation du risque peut être utile lors de la détermination d'un niveau de probabilité approprié pour le séisme SEE (ANCOLD, 1994).

On préfère les méthodes déterministes pour guider le choix du lieu et de la magnitude des séismes maximaux possibles (NRC, 1984); cependant, les méthodes probabilistes sont utiles comme sources d'informations supplémentaires pour l'évaluation finale du séisme choisi de façon déterministe. La méthodologie suivante est préconisée pour le choix du séisme maximal possible :

(1) Toute faille importante connue ou suspectée, toute bande de localisation de séismes passés, ou tout alignement d'activité sismique doit être pris comme source potentielle de séismes. On établit une cartographie régionale matérialisant toutes les informations tectoniques, géologiques, géophysiques et physiques, et les épicentres sismiques. Une carte locale à grande échelle (par exemple, 1/250 000) donnant ces mêmes informations est également établie.

(2) Le séisme maximal possible MCE est positionné sur la source potentielle, au plus près du site du barrage.

(3) La magnitude de ce séisme est prise égale à celle du séisme maximal (M_x) choisi par les sismologues, à partir de considérations sismologiques et géologiques, pour la zone sismogénique contenant la source potentielle.

(4) Il est parfois impossible d'établir le séisme MCE par la méthodologie ci-dessus, en l'absence de signes superficiels ou d'informations sur la localisation des séismes. Dans ce cas, on peut utiliser la méthode probabiliste d'évaluation du risque sismique proposée par Cornell et McGuire, pour choisir les valeurs des mouvements du sol (accélération et vitesse maximales). Les modèles utilisés dans les analyses probabilistes concernent les périodes de retour (magnitude maximale, séisme caractéristique, etc.) (Idriss, 1985; McGuire et Arabasz, 1990).

Les méthodes ci-dessus, représentant les pratiques actuelles, sont à réviser en permanence, afin de suivre l'évolution continue des conditions techniques, sociales et administratives.

very low probability of exceedance (corresponding to, e.g., an annual probability of exceedance in the order of one in 10 000). The level of the safety evaluation earthquake, SEE, could have a higher annual probability of exceedance depending on the importance of the tailings dam involved as well as the consequences of dam failure (Seed 1982). Risk assessment could be a useful tool in establishing an appropriate probability level of the safety evaluation earthquake (ANCOLD 1994).

Deterministic procedures are preferred to select the location and magnitude of maximum credible events (NRC 1984), however, probabilistic procedures may be useful to provide additional information for the final appraisal of the deterministically chosen events. The following steps are suggested to select the maximum credible earthquakes :

(1) Any major mapped fault, inferred fault or physiographic feature along which earthquakes have been recorded or any alignment of earthquake activity should be considered as a potential seismic source. A regional map should be prepared which includes tectonic, geologic, geophysical, and physiographic information as well as earthquake epicentres. Similarly, a larger scale local map (say at a scale of 1 :250 000) containing the same information should also be prepared.

(2) The maximum credible earthquake should be selected at a location along each identified potential source, at its closest point to the site.

(3) The magnitude of the maximum credible earthquake should be selected as the value of the maximum earthquake (M_x), chosen by seismologists based on seismological and geologic considerations, for the seismogenic zone within which the source feature lies.

(4) There may be cases where an MCE cannot be established by the above procedures, because of a lack of well-defined surface features or seismicity patterns. For such cases, the Cornell-McGuire probabilistic seismic hazard evaluation method may be used to select design ground motion parameters such as peak acceleration and peak velocity. Earthquake recurrence models including maximum-magnitude model, characteristic earthquake model and others are used in the probabilistic analysis (Idriss 1985; McGuire and Arabasz, 1990).

The above procedures, which represent present practice, require continual review and revision to remain current in an ever changing technical, societal, and regulatory environment.

3. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Pour la collecte des données de base nécessaires aux calculs de stabilité sismique, l'étude géotechnique (sur le site et en laboratoire) vise à caractériser les matériaux du barrage et de sa fondation, dont la résistance risque de diminuer sous l'effet des secousses sismiques provoquant des surpressions interstitielles et/ou des déformations excessives. Le chapitre 2 du Manuel (CIGB, 1982) traite de la reconnaissance du site sous son aspect général. Dans le présent chapitre, on se limite aux éléments géotechniques influençant le comportement du barrage lors d'un séisme, tels que pressions interstitielles, densité en place, caractéristiques statiques et dynamiques des matériaux.

3.1. RECONNAISSANCES SUR LE SITE

Outre la prise d'échantillons destinés aux analyses en laboratoire, l'étude géotechnique du site précise les conditions en place : surface de saturation dans le remblai, pressions interstitielles dans la fondation, densités en place, vitesses des ondes sismiques transversales. Les techniques utilisées dans ce but sont notamment :

(1) Pressions interstitielles : Des piézomètres (ouverts, cellules pneumatiques ou électriques) sont implantés pour contrôler les pressions interstitielles (CIGB, 1969; CIGB, 1988a; Dunnycliff, 1988; CIGB, 1989b; CIGB, 1992a), la localisation de la ligne de saturation dans le corps du barrage, et les pressions interstitielles dans la fondation. On recherche les nappes perchées éventuellement situées au-dessus de la surface de saturation (notamment pour les barrages construits par la méthode « amont »). Pour réduire au maximum la gêne apportée aux travaux par les tubages des piézomètres ouverts, ceux-ci sont groupés avec les autres appareils de mesure. Ces groupes sont protégés par une barrière physique et une signalisation très visible. La lecture des piézomètres se poursuit à intervalles réguliers afin de suivre les variations saisonnières et à plus long terme. Les piézomètres sont relevés immédiatement après chaque séisme pour détecter toute augmentation éventuelle des pressions interstitielles (CIGB, 1988c). Si une activité sismique fréquente est à craindre, la mise en place de piézomètres dynamiques et d'accéléromètres permet de suivre de très près l'évolution des pressions interstitielles induites (Troncoso *et al.*, 1990).

(2) Densité en place : Lorsque les terres du remblai et de la fondation sont des silts ou des sables sans cohésion, leur densité en place est mesurée directement sur échantillons intacts ou évaluée indirectement par des méthodes géophysiques : sonde gamma-gamma, sonde électrique, sonde gamma, nucléodensimètre, sonde à résistance électrique (Corps of Engineers, 1979), pénétromètre SPT (ASTM, 1984; ISSMFE, 1988) ou pénétromètre statique au cône (ASTM, 1986), les corrélations

3. GEOTECHNICAL EVALUATION

To provide basic data for seismic stability analysis, a geotechnical evaluation usually includes both field and laboratory investigations with emphasis on materials either within the dam or its foundation which would weaken under earthquake shaking due to pore pressure build-up and/or excessive straining. Chapter 2 of the Manual (ICOLD 1982) covers general aspects of site investigation. This section focuses on geotechnical aspects which have a significant influence on the seismic behaviour of a tailings dam such as pore pressure conditions, in situ density, and static and dynamic material properties.

3.1. FIELD INVESTIGATIONS

In addition to retrieving undisturbed samples for subsequent laboratory testing, a seismic investigation field program is focused on determining important in situ conditions: the phreatic surface in the damfill, foundation pore pressures, in situ densities, and seismic shear wave velocities. Field techniques used in obtaining this information are briefly discussed below:

(1) Pore pressure conditions: Standpipes, pneumatic and electric piezometers can be used to monitor pore pressure conditions (ICOLD 1969, ICOLD 1988a, Dunicliff 1988, ICOLD 1989b, ICOLD 1992a), including the determination of the phreatic surface within the dam and foundation pore pressures. The presence of perched water tables above the phreatic surface, especially for upstream tailings dams, should be investigated. Construction interference with standpipe piezometers should be minimized by placing piezometers and other instrumentation in clusters. These instrument clusters are to be protected by physical barriers and marked by large visible signs. Piezometers should be regularly monitored to follow seasonal and long-term variations. Immediately following an earthquake, all piezometers should be read to check for the potential pore pressure increases (ICOLD 1988c). In special situations where frequent earthquakes are expected, dynamic piezometers as well as accelerometers should be installed to closely monitor the development of earthquake-induced pore pressures (Troncoso *et al.*, 1990).

(2) In situ density: In situ densities of the embankment and foundation soils involving cohesionless sands and silts can be measured directly by retrieving undisturbed samples. Alternatively, the in situ denseness of the materials involved can be evaluated indirectly by other methods such as geophysical logging including gamma-gamma and electric calliper probes, gamma and neutron probes and resistivity probes (Corps of Engineers 1979); standard penetration tests (ASTM 1984,

de ces paramètres *in situ* avec la réponse sismique du sous-sol en termes d'augmentation des pressions interstitielles et de résistance au cisaillement sont établies empiriquement.

Le choix des méthodes à utiliser est influencé par la disponibilité des appareils sur place et les coûts. Plusieurs méthodes sont généralement utilisées pour une étude de terrain afin de les étalonner les unes par rapport aux autres et d'optimiser le programme en utilisant de préférence la méthode la moins onéreuse ainsi étalonnée.

Compte tenu du rôle important joué par la densité en place, il est essentiel de mettre en place un programme de contrôle de la qualité bien préparé afin de s'assurer de la collecte de données fiables. On a souvent recours à des sous-traitants spécialisés pour l'exécution des profils géophysiques et des essais de pénétromètre statique au cône. Les échantillons intacts sont pris au moyen du carottier à piston fixe ou, plus rarement, du carottier à piston hydraulique (Hvorslev, 1949; Marcusson et Franklin, 1979). Pour l'essai de pénétration SPT, on suit de très près la procédure publiée (énergie appliquée, etc.) afin que la résistance de pénétration standard puisse être normalisée pour les effets de la pression du terrain de couverture et de l'énergie fournie à la tige de forage (Seed *et al.*, 1985; Skempton, 1986). La résistance de pénétration normalisée $(N_1)_{60}$ a été mise en corrélation avec le potentiel de liquéfaction (Seed *et al.*, 1985) et avec la résistance résiduelle (Seed, 1987; Seed et Harder, 1990). Des corrélations analogues existent pour l'essai statique au cône (Robertson et Campanella, 1985; Seed et de Alba 1986; Shibata et Teparaksa, 1988; Mitchell et Tseng, 1990; Kayen *et al.*, 1992).

L'expérience acquise lors de certains séismes récents semble indiquer que les terres saturées de granulométrie grossière (graviers, cailloux roulés) renfermant une grande proportion de matériaux sableux lâches risquent de perdre une bonne partie de leur résistance au cisaillement pendant et immédiatement après un séisme, par suite de la montée des pressions interstitielles provoquée par les secousses (Wang, 1984; Harder, 1991; Valera et Kaneshiro, 1991). L'évaluation de la compacité de ces terres (barrage ou, plus fréquemment, fondation) et de leur résistance aux sollicitations sismiques demande des équipements et des techniques adaptées.

Actuellement, on semble s'orienter vers un pénétromètre de plus grandes dimensions, les résultats étant corrélés avec la valeur N (nombre de coups) de l'essai classique SPT afin de profiter de l'existence de la grande base de données SPT. Un grand pénétromètre a été utilisé au Japon (Yoshida *et al.*, 1988). En Amérique du Nord, un grand pénétromètre connu sous le nom de l'appareil Becker est le procédé classique. Il utilise la foreuse Becker associée à un marteau double action entraîné par un groupe diesel à injection (modèle 180 de International Construction Equipment). Cette foreuse, initialement développée au Canada à la fin des années 50, est très répandue dans le monde entier pour l'exploration des dépôts de graviers et de cailloux en site difficile.

Harder et Seed (1986) établirent une corrélation entre les valeurs de N dans les essais Becker et SPT, après correction des valeurs Becker enregistrées sur les chantiers. Cette correction est basée sur la mesure de la pression dans la chambre de rebond du mouton. Elle est basée sur une courbe d'étalonnage à combustion constante établie pour la foreuse Becker type AP 1 000 avec tubage fermé à double paroi, de 170 mm de diamètre. Cette méthode implique les simplifications sui-

ISSMFE 1988); and static-cone penetration tests (ASTM 1986). Correlations of these field parameters with the subsoil's seismic response in terms of pore pressure increase and shearing strength are established empirically.

Selection of the field methods used to evaluate the in situ denseness of soils depends on local availability of equipment and economic considerations. Usually, a field program involves more than one method. This practice allows a cross check of each method adopted as well as the optimization of the program by using more extensively the less costly methods after the check.

Because of the extreme importance of density evaluation, a well-prepared quality control program is essential for obtaining reliable data. Specialized sub-contractors are often engaged to perform geophysical logging and static-cone penetration tests. Fixed-piston samplers and occasionally hydraulic piston samplers are employed for retrieving undisturbed samples (Hvorslev 1949 and Marcusson and Franklin 1979). For standard penetration tests (SPT), energy input and test procedures should be documented in detail so that the standard penetration resistance can be normalized for the effects of overburden pressure and energy delivered to drill rod (Seed *et al.*, 1985; and Skempton, 1986). The normalized penetration resistance $(N_1)_{60}$ has been correlated with liquefaction potential (Seed *et al.*, 1985) and residual strength (Seed 1987 and Seed and Harder 1990). Similar correlations have been established for normalized CPT data (Robertson and Campanella 1985, Seed and de Alba 1986, Shibata and Teeparaksa 1988, Mitchell and Tseng 1990, and Kayen *et al.*, 1992).

Experiences in recent earthquakes indicate that saturated coarse gravelly and cobbly soils containing substantial amounts of loose sandy materials could lose a significant portion of their shear strength during and immediately after earthquake shaking due to pore pressure build-up (Wang 1984, Harder 1991, and Valera and Kaneshiro 1991). Thus, the presence of this type of soil within a dam or, more frequently, within its foundation requires the evaluation of the in situ denseness and seismic resistance of these coarse materials by special equipment and techniques.

Current practice appears to use some kind of relatively larger penetration test and correlate its blow counts to the SPT N - values in order to make use of the large liquefaction performance database currently available for the SPT test. Larger penetration tests have been used in Japan (Yoshida *et al.*, 1988). In North America, a large penetration test known as the Becker Penetration Test (BPT) is the standard procedure. It uses the Becker hammer drill with an International Construction Equipment (ICE) model 180 double-acting atomized fuel injection diesel pile hammer. The drill was originally designed in the late 1950s in Canada, and used widely around the world since then for exploration in difficult sites involving cobbly and gravelly soils.

Harder and Seed (1986) obtained a correlation between BPT and SPT blowcounts, after first correcting the field BPT blowcounts based on measured bounce-chamber pressure of the diesel hammer. The correction is based on a constant combustion calibration curve established for AP1000 type Becker drill rig using 170 mm diameter double-walled closed-ended casing. This procedure involves the following simplifications: (1) measuring bounce-chamber pressure of the diesel

vantes : (1) on mesure la pression dans la chambre de rebond du mouton comme indication de l'énergie du mouton, (2) on établit la corrélation en utilisant un type particulier de mouton diesel fonctionnant sur un type particulier de tubage Becker, (3) on néglige l'effet de frottement entre le tubage et le sol environnant. Le troisième facteur peut être important dans les essais profonds (Stewart *et al.*, 1990). On a appliqué cependant cette méthode à l'évaluation de la résistance aux sollicitations sismiques de barrages existants (Harder, 1988; Stewart *et al.*, 1990; Harder, 1992; Sykora *et al.*, 1992).

Récemment, Sy et Campanella (1993 et 1994) ont proposé une approche plus rationnelle pour l'établissement de corrélations entre les N Becker et SPT, avec une application plus généralisée. Ces auteurs ont utilisé une approche plus théorique en mesurant l'énergie maximale transférée au sommet du tubage Becker, et en rapportant les N Becker obtenus sur les chantiers à un niveau d'énergie de référence correspondant à 30 % de l'énergie nominale du mouton (11 kJ); une méthode analogue est utilisée actuellement pour la correction de l'énergie SPT. De plus, ces auteurs ont tenu compte du frottement du tubage en mesurant les ondes de contraintes dynamiques lors d'un essai Becker. A l'aide des lois ondulatoires et des étalonnages sur site, ils ont établi une famille de courbes reliant les N Becker et SPT en fonction de la résistance due au frottement, qui dépend du diamètre du tubage et de la profondeur de pénétration de celui-ci. L'application de ces méthodes à l'étude du comportement sismique des barrages mettant en jeu des matériaux grossiers (Lum et Yan, 1994) permettra de progresser dans ce domaine.

(3) Vitesses des ondes sismiques : Des essais en forage et entre forages au moyen de dispositifs d'émission, de réception et d'enregistrement sont utilisés pour la détermination des vitesses des ondes sismiques en place (ondes longitudinale et transversale). La tomographie sismique est aussi utilisée pour fournir une carte continue de la répartition des vitesses sismiques le long des sections critiques longitudinales ou transversales, ou dans les sections entre forages (Cottin *et al.*, 1986; Chiu *et al.*, 1986; Chiu et Stewart, 1987; Pratt et Worthington, 1988). Les progrès récents dans le domaine des cônes permettent la mesure de la vitesse de l'onde transversale, de la résistance à la pénétration et des pressions interstitielles statiques et dynamiques des sous-sols à granulométrie fine (sableuse ou plus fine), en continu dans un seul forage, à l'aide d'un cône sismique (Finn *et al.*, 1989). Le cône sismique, lorsqu'il est adapté, réduit le coût de la détermination de la vitesse transversale. On a proposé une corrélation directe entre cette vitesse et le potentiel de liquéfaction (Bierschwale et Stokoe, 1984; Stokoe *et al.*, 1988; Tokimatsu *et al.*, 1989 et 1991; Robertson *et al.*, 1992; Kayen *et al.*, 1992). L'analyse spectrale des ondes de surface (SASW), d'application facile et de faible coût, est utilisée de plus en plus pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction (Stokoe et Nazarian, 1984; Tokimatsu *et al.*, 1991).

3.2. ÉTUDES EN LABORATOIRE

Les programmes complets d'études en laboratoire pour les sols non cohérents comprennent notamment des essais d'identification (densité spécifique, granulométrie, densités sèches maximale et minimale, ...) caractérisant les terres, ainsi que des

hammer as an indication of hammer energy, (2) obtaining the correlation using a specific type of diesel hammer operating on a specific type of Becker casing, and (3) neglecting the effect of friction between the Becker casing and surrounding soil. The third factor can be significant in deep penetration tests, as illustrated by Stewart *et al.* (1990). The procedure, however, has been used to evaluate seismic resistance of existing dams (Harder 1988, Stewart *et al.*, 1990, Harder 1992, Sykora *et al.*, 1992).

Recently, Sy and Campanella (1993 and 1994) proposed a more rational procedure to establish the correlations between BPT and SPT blowcounts for more general applications. They employed a more fundamental approach by measuring the maximum energy transferred to the top of the Becker casing, and corrected the field BPT blowcounts to a reference energy level corresponding to 30% of the hammer rated energy (11 kJ), similar to the procedure currently used in SPT energy correction. Moreover, they accounted for the casing friction effect by measuring the impact stress waves during the Becker penetration test. By means of wave equation analyses and field calibrations, they established a family of correlation curves between BPT and SPT blowcounts with varying friction resistance depending on the diameter and penetration depth of the casing. Applications of these proposed procedures to study the seismic performance of dams involving coarse deposits (Lum and Yan 1994) will further advance the current state-of-the-art.

(3) Seismic wave velocity : Downhole and crosshole techniques involving wave generating, receiving and recording devices are employed to determine in situ seismic wave velocities (shear and compression waves). Seismic tomography is also used to provide a continuous mapping of the seismic velocity distribution along critical longitudinal or transverse sections or sections between boreholes (Cottin *et al.*, 1986; Chiu *et al.*, 1986; Chiu and Stewart, 1987; Pratt and Worthington, 1988). Recent developments in cone technology allow the measurement of shear wave velocities, cone resistances, and static and dynamic pore pressures in subsoils involving sand-size or finer materials in a continuous operation within the same hole using a seismic cone (Finn *et al.*, 1989). When applicable, the seismic cone reduces the cost of determining shear wave velocity. Direct correlation of in situ shear wave velocity with liquefaction potential has been proposed (Bierschwale and Stokoe, 1984; Stokoe *et al.*, 1988; Tokimatsu *et al.*, 1989 and 1991; Robertson *et al.*, 1992; and Kayen *et al.*, 1992). The spectral analysis of surface waves (SASW) is being used increasingly for liquefaction potential evaluation because of the convenience and low cost (Stokoe and Nazarian, 1984; and Tokimatsu *et al.*, 1991).

3.2. LABORATORY INVESTIGATIONS

Comprehensive laboratory test programs for cohesionless soils should include index properties, such as specific gravity, gradation, and maximum and minimum dry densities for characterizing the soils as well as static and dynamic engineering

essais statiques et dynamiques destinés à obtenir les paramètres pour les calculs statiques et dynamiques. Les essais suivants sont en général effectués :

(1) Essai triaxial consolidé-drainé avec mesures des déformations et des contraintes, en vue d'obtenir les caractéristiques statiques du sol : résistance au cisaillement, résistance au cisaillement fonction de la déformation, modules de cisaillement et coefficient de Poisson.

(2) Essai triaxial consolidé-non drainé, à contrainte contrôlée (ou à déformation contrôlée, éventuellement), utilisé pour déterminer la résistance en régime permanent (Castro, 1969; Poulos, 1981) et pour préciser les caractéristiques de dilatation et de contraction du sol. Ces essais sont indispensables pour évaluer la sensibilité des talus du barrage aux glissements.

(3) Essai triaxial consolidé-non drainé, avec cycles, et enregistrement des pressions interstitielles, des contraintes et des déformations, afin d'établir l'évolution cyclique des déformations et des pressions interstitielles résultant des charges sismiques.

(4) Essai triaxial avec cycles à la colonne résonnante pour déterminer les variations du module de cisaillement et de l'amortissement en fonction des déformations de cisaillement.

properties for determining soil parameters for static and dynamic analyses. The following tests are generally used.

(1) Static triaxial consolidated-drained shear tests with stress-strain measurements to obtain static soil properties such as shear strength parameters, strain-dependent shear and bulk moduli, and Poisson's ratio.

(2) Static triaxial consolidated-undrained shear tests with stress-control (or strain-control, if equivalent) are used to determine the steady-state strength (Castro 1969 and Poulos 1981) and to check the dilative or contractive characteristics of the soil. These tests are essential for assessing the susceptibility of dam slopes to flow slides.

(3) Cyclic triaxial consolidated-undrained tests with pore pressure and stress-strain measurements to establish cyclic strain increase and pore pressure rise due to seismic loadings.

(4) Cyclic triaxial and resonant column tests to determine variations of shear modulus and damping properties with shear strain.

4. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES BARRAGES DE STÉRILES

Les chapitres 3 et 4 du Manuel (CIGB, 1982) présentent des recommandations concernant la conception, la construction et l'exploitation des barrages de stériles. Par ailleurs, la CIGB (Bulletin 44a, 1989a) a récemment mis à jour la bibliographie sur les barrages et dépôts de stériles miniers et industriels, et a publié des recommandations concernant la sécurité de ces ouvrages (Bulletin 74, 1989d). On se contente ici de préciser certains aspects de conception et de construction étroitement liés à la stabilité sismique. Pour plus de détails, le lecteur est convié à consulter les ouvrages cités.

La fondation du barrage comporte généralement une ou plusieurs couches d'origine colluviale, glaciaire, fluviale, lacustre ou éolienne, reposant sur le rocher sous-jacent. Selon la raideur et l'épaisseur de cette couverture de terrain meuble, les mouvements sismiques du rocher peuvent être modifiés lors du passage des ondes sismiques dans ces couches (amplification ou amortissement, et modification du spectre de fréquences). On peut évaluer cet effet propre au site par un calcul dynamique de réponse du sol. Par ailleurs, les couches saturées de terre lâche et sans cohésion, ainsi que certains matériaux cohérents sensibles, subissent parfois une perte de résistance mécanique et sont à étudier avec soin. Les fondations de faible résistance, comprenant les sous-sols et bedrocks contenant de l'argile, sont les sièges potentiels de déformations. Un calcul approfondi de stabilité, faisant intervenir une résistance du cisaillement adéquate des matériaux de la fondation, ainsi qu'une auscultation suivie des déformations de la fondation, sont indispensables pour s'assurer de la stabilité du barrage et suivre l'évolution des déformations. De cette façon, la déformation induite par le séisme peut être évaluée séparément de celles résultant des charges statiques. La surveillance des déformations comprend des mesures topographiques des déformations se manifestant en surface, et des mesures clinométriques pour l'obtention de profils de déformations de la fondation.

Les matériaux entrant dans la construction des barrages de stériles sont souvent des enrochements, des terres cohérentes, des terres pulvérulentes et des sables de stériles. En ce qui concerne leur comportement en cas de séisme, le cas le plus défavorable concerne les terres pulvérulentes ou les sables de stériles à l'état lâche et saturé. En effet, la liquéfaction de ces matériaux sous l'action du séisme fait chuter leur résistance mécanique, conduisant souvent à un glissement par écoulement. Dans d'autres cas, le séisme peut provoquer des affaissements, tassements différentiels, et étalements latéraux accompagnés de fissuration longitudinale et transversale.

Les points à étudier sont notamment le choix des pentes des talus du remblai, le zonage, les drains et filtres, et le compactage. La pente des talus, ainsi que la perméabilité et la densité des remblais, sont choisies en fonction du séisme de projet. La construction par la méthode aval ou de l'axe central est préférée. Ceci est confirmé par le fait que la plupart des barrages de stériles qui se sont rompus

4. DESIGN AND CONSTRUCTION OF TAILINGS DAM

Chapters 3 and 4 of the Manual (ICOLD 1982) describe recommended practices for the design, construction and operation of tailings dams. Furthermore, ICOLD (Bull. 44a, 1989a) recently updated the bibliography of references related to mine and industrial tailings dams and dumps, and issued tailings dam safety guidelines (Bull. 74, 1989d). This section is limited to pointing out certain tailings dam design and construction aspects that are closely related to seismic stability. The reader is referred to the above references for a more detailed review of the subject.

Dam foundations generally involve bedrock, and one or more of colluvial, glacial, fluvial, lacustrine or aeolian soils. Depending on the stiffness and thickness of the overburden soils, the rock motion can be altered as seismic waves propagate through the deposits resulting in either amplification or de-amplification as well as changes in frequency content. This local site effect can be evaluated by dynamic ground response analysis. Furthermore, saturated loose cohesionless deposits and sensitive cohesive deposits may be subject to strength loss and require special attention. Weak foundations including subsoils and bedrocks containing clay minerals are potential seats of foundation deformations. Careful stability analysis using appropriate shear strength of the weak foundation materials and ongoing monitoring of foundation deformation are essential for ensuring dam stability and tracking deformation history. Thus, earthquake induced deformation can be assessed separately from those caused by static loads. Deformation monitoring includes periodical surveys for detecting the deformation revealed on the surface and installation and monitoring of inclinometers for checking the foundation deformation profiles.

Materials used for construction of tailings dams often include rockfill, cohesive earthfill, cohesionless earthfill, and tailings sand. In terms of earthquake performance of these materials, the worst situation is when cohesionless earthfill or tailings sand is in a loose and saturated state. Liquefaction of these materials under earthquake loading causes severe loss of strength often leading to flow slides. In other circumstances, earthquake loading can cause subsidence, differential settlement and lateral spreading with attendant longitudinal and transverse cracking.

Dam design considerations include selection of embankment slopes, embankment zoning and drainage and filter provisions and compaction of the embankment fill. The flatness of the side slopes, and the perviousness and density of the embankment fill can be chosen to meet the demand of the design earthquake. Downstream and centreline construction methods are preferred for earthquake-resistant

ont été construits par la méthode amont. De plus, les méthodes aval et de l'axe central permettant de compacter les remblais, d'installer des dispositifs de drainage interne et d'exercer un meilleur contrôle des travaux (CIGB, 1986) au cours de la préparation de la fondation et de la mise en place des remblais.

Lorsqu'un barrage en remblai est utilisé pour stocker des stériles, on peut le considérer comme un barrage de stériles construit par la méthode aval. Ainsi, tous les chapitres de ce rapport s'appliquent également à ce type de barrage classique. Cependant, il faut se rappeler les différences de conception et de réalisation existant entre un tel barrage et un barrage en remblai destiné à stocker de l'eau. Ces différences sont notamment : (1) la zone relativement imperméable constituée par les stériles amont, (2) l'augmentation potentielle de la poussée contre le barrage de stériles résultant de la liquéfaction partielle ou totale des stériles au cours d'un séisme, (3) la surveillance de la construction du barrage en général effectuée par le personnel de l'exploitation minière, comme faisant partie de l'ensemble de ses activités, et non par un personnel de génie civil sous la forme d'une tâche spécifique, (4) les longues périodes de construction et postérieure à la construction caractérisant un barrage de stériles, etc. (Klohn *et al.*, 1978; CIGB, 1982).

tailings dams. This is borne out by the fact that most of the failed tailings dams were constructed by the upstream method. Moreover, the downstream and centre-line methods offer the opportunity to compact the fill, install internal drainage systems and exercise better construction control (ICOLD 1986) during foundation preparation and the placement of the fill.

When an embankment dam is used for retaining tailings, it could be regarded as a tailings dam constructed by the downstream method. Thus, all pertinent sections in this report apply equally to this type of conventional dam. However, it is worth bearing in mind the conceptual as well as practical differences between such a dam and an embankment dam used for water storage. These differences include : (1) the upstream tailings functioning as a relatively impervious seepage barrier, (2) the potential increase of the thrust force against the tailings dam due to partial or full liquefaction of the tailings during an earthquake, (3) the monitoring of dam construction usually performed by mining personnel as part of overall working routines rather than by civil engineering personnel as a dedicated task, and (4) the long construction period and post-construction life associated with a tailings dam, etc. (Klohn *et al.*, 1978, and ICOLD 1982).

5. CALCUL DE STABILITÉ SISMIQUE

Les données empiriques (Conlin 1987; Lo *et al.*, 1988) reliant le comportement des barrages de stériles aux caractéristiques du séisme (magnitude, éloignement) concernent d'anciens barrages construits selon la méthode « amont »; elles constituent un outil pratique intéressant pour une première évaluation de la stabilité de ces ouvrages. Par contre, on peut supposer que les barrages construits selon les méthodes « aval » ou « de l'axe central » auront un meilleur comportement vis-à-vis des sollicitations sismiques.

Dans le cas des barrages de stériles construits en enrochement, en terre cohérente, ou en sable dense et bien compacté, matériaux dont la perte de résistance mécanique est peu importante lors d'un séisme, le calcul pseudo-statique est suffisant pour l'évaluation de leur stabilité sismique (Seed, 1979). Les calculs du type proposé par Newmark (Newmark, 1965; Franklin et Chang, 1977; Houston *et al.*, 1987) permettent également l'évaluation des déformations permanentes provoquées par un séisme, lorsque des valeurs de résistance appropriées sont adoptées.

Pour l'évaluation de la stabilité sismique des barrages de stériles où des sables moyennement denses sont présents dans le remblai ou dans la fondation, il faut porter une attention particulière à la fois au choix des méthodes de calcul de stabilité sismique à appliquer et à l'interprétation des résultats ainsi obtenus. On adopte souvent une approche par étapes, en commençant par un calcul simplifié et en progressant vers des méthodes plus complexes selon les besoins particuliers. Par ordre croissant de coût et de complexité, les méthodes sont :

- (1) Calcul de stabilité statique utilisant le concept de l'équilibre limite et la résistance en régime permanent,
- (2) Calcul de stabilité sismique simplifié,
- (3) Calcul de stabilité sismique par la méthode des éléments finis.

5.1. CALCUL DE STABILITÉ STATIQUE UTILISANT LE CONCEPT DE L'ÉQUILIBRE LIMITE ET LA RÉSISTANCE EN RÉGIME PERMANENT

Dans ce type de calcul, la résistance en régime permanent (résistance résiduelle) sur une surface de rupture potentielle est utilisée dans un calcul statique utilisant le concept de l'équilibre limite. Les forces d'inertie dues au séisme sont exclues, ces forces étant de durée très courte, et le barrage étant considéré capable d'absorber les déplacements éventuels correspondants.

Si le matériau pulvérulent présente une pointe sur la courbe des contraintes effectives (état non drainé), il est prudent de ne compter sur aucune résistance

5. SEISMIC STABILITY ANALYSIS

The empirical data (Conlin 1987; and Lo *et al.*, 1988) relating tailings dam behaviour to magnitude and epicentral distance of the earthquake reflects the behaviour of older conventional "upstream construction type" tailings dams and offers a valuable practical tool for preliminary stability assessments of these structures. Tailings dams constructed using downstream and centreline methods would be expected to exhibit better performance under earthquake loading.

For tailings dams constructed of rockfill, cohesive earthfill, or well-compacted dense sandfill, which undergo little strength loss under earthquake loading, pseudo-static stability analysis will provide adequate assessment of their seismic stability (Seed 1979). Newmark type of deformation analyses (Newmark 1965; Franklin and Chang 1977; and Houston *et al.*, 1987) will further provide estimates of earthquake-induced permanent deformation, when appropriate yield strengths are used.

For seismic stability assessment of tailings dams involving medium dense sands in either the embankment or the foundation, both the selection of methods of seismic stability analysis and the interpretation of results obtained from these analyses require special attention. This is often carried out in a staged approach, which involves starting with a simpler analysis and progressing to more complex analyses as required by the specific case. In ascending order of cost and complexity, these are :

- (1) Static Limit-equilibrium Stability Analysis using Steady-State Strength;
- (2) Simplified Seismic Stability Analysis; and
- (3) Finite-Element Seismic Stability Analysis.

5.1. STATIC LIMIT-EQUILIBRIUM STABILITY ANALYSIS USING STEADY-STATE STRENGTH

In this type of analysis the steady-state (or residual) strength along a potential failure surface is used in a conventional static limit-equilibrium stability analysis. The inertial forces caused by the earthquake are not included as these are of very short duration and the dam is assumed capable of safely absorbing any movements resulting from those inertial forces.

If the cohesionless material exhibits a peak state in its effective-stress undrained vector curve, it is prudent not to rely on any strength over and above the

au-dessus ou au-dessous de la résistance en régime permanent. Cette méthode prudente vise à se protéger contre le déclenchement possible d'un mécanisme de rupture progressive sous l'effet des charges sismiques (Castro, 1991; Lo *et al.*, 1991).

Le calcul de stabilité utilisant le concept de l'équilibre limite et la résistance en régime permanent est un calcul rapide et relativement peu onéreux; il correspond aux conditions les plus sévères qui puissent se produire lors d'un séisme, en cas de présence de matériaux sans cohésion, saturés, et de densité faible à moyenne. Si le barrage est jugé stable après ce calcul, et que les déformations entraînées par le passage aux conditions de régime permanent sont acceptables, un calcul plus complexe est inutile. Par contre, si ce calcul indique la possibilité d'instabilité, l'étape suivante consiste à exécuter un calcul de stabilité sismique simplifié ou un calcul de stabilité sismique par la méthode des éléments finis, pour voir si le séisme de projet est capable d'amorcer le processus qui aboutit au régime permanent.

5.2. CALCUL DE STABILITÉ SISMIQUE SIMPLIFIÉ

Cette étape repose sur un calcul de stabilité sismique simplifié. Dans ce calcul, il convient de tenir compte des éléments suivants :

- séisme de projet avec tous les paramètres correspondants, souvent exprimé sous la forme d'un coefficient sismique (Seed et Martin, 1966);
- surpressions interstitielles induites par le séisme dans le remblai et/ou la fondation, souvent évaluées à l'aide d'essais en laboratoire et/ou de corrélations avec les essais *in situ*;
- surcharge appliquée par les stériles stockés ayant perdu la totalité ou une partie de leur résistance lors du séisme, souvent évaluée à l'aide d'un programme de réponse dynamique, à une dimension, tel que SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) ou DESRA (Lee et Finn, 1978).

Moyennant la prise en compte des éléments ci-dessus, le calcul de stabilité utilisant le concept de l'équilibre limite, après passage du séisme, permet une évaluation du comportement sismique suffisante à cette étape (Klohn *et al.*, 1978; Seed, 1979).

5.3. CALCUL DE STABILITÉ SISMIQUE PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Ce calcul correspond à la méthode la plus récente pour le calcul sismique des barrages de stériles (Finn *et al.*, 1990). Il nécessite des logiciels complexes, et le recours aux connaissances et aux expériences d'un grand nombre de spécialistes, outre l'analyste spécialisé dans la méthode des éléments finis. Il est relativement long et onéreux. Cependant, grâce aux progrès rapides dans le domaine des ordinateurs, l'application de cette méthode à l'établissement des projets se développe. Les principales étapes de mise en œuvre d'un tel calcul sont les suivantes :

steady-state strength. This conservative approach is to safeguard against the possibility of triggering a progressive failure mechanism by earthquake loadings (Castro, 1991; Lo *et al.*, 1991).

The limit-equilibrium stability analysis using the steady-state strength is a quick and relatively inexpensive form of analysis and represents the worst possible conditions that could develop during an earthquake for a dam involving saturated cohesionless materials of low to medium density. If a dam is judged to be safe by this analysis and the deformations associated with reaching the steady-state condition can be accepted, more sophisticated analyses are not required. On the other hand, if this analysis indicates that a problem in stability might exist, then the next stage in the evaluation would be to run either a simplified seismic stability analysis or a finite-element seismic stability analysis to check whether the design earthquake is capable of triggering the process leading to the steady-state condition.

5.2. SIMPLIFIED SEISMIC STABILITY ANALYSIS

The next stage involves a simplified seismic stability analysis. Minimum requirements of such an analysis include appropriate accounting for the following factors :

- a design earthquake with its related parameters, often expressed as a seismic coefficient (Seed and Martin, 1966);
- seismic pore pressure build-up in damfill and/or foundation, often evaluated with the aid of laboratory testings and/or correlations with in situ field testings; and
- additional pond force resulting from partial or full loss of strength in tailings stored in the pond due to earthquake shaking, often evaluated with a one-dimensional dynamic response program such as SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) or DESRA (Lee and Finn, 1978).

A post-earthquake limit-equilibrium stability analysis adequately incorporating the above factors will provide a reasonable seismic assessment at this stage (Klohn *et al.*, 1978 and Seed 1979).

5.3. FINITE ELEMENT SEISMIC STABILITY ANALYSIS

Finite element seismic stability analysis represents the current state-of-the-art for seismic analysis of tailings dams (Finn *et al.*, 1990). It involves complicated, finite-element, computer programs; requires the input of a broad spectrum of engineering skills and experience including that of the finite-element analyst. It is relatively time consuming and expensive. However, with the recent rapid advancement of computer technology, its application to projects has become more common. The following comments highlight the necessary steps in conducting such an analysis :

(1) Détermination des caractéristiques statiques et dynamiques des matériaux constituant le barrage et sa fondation;

(2) Essais en laboratoire sur des échantillons représentatifs, essais destinés à reproduire les cas de charges (contraintes statiques initiales + contraintes dynamiques) et à déterminer leurs effets (pressions interstitielles, déformations).

(3) Détermination des contraintes statiques du barrage avant séisme.

(4) Pour le séisme de projet, détermination des mouvements sismiques auxquels la fondation et le barrage sont soumis, en fonction du temps.

(5) Détermination de la réponse dynamique du barrage et de sa fondation aux sollicitations sismiques déterminées dans l'étape (4).

(6) Si l'étape (5) est conduite au moyen d'une méthode non-linéaire en contraintes effectives, telle que TARA-3 (Finn et Yogendrakumar, 1987), tous les paramètres de la réponse (pressions interstitielles induites, déformations, ...) sont calculés directement. Par contre, dans le cas d'un calcul classique linéaire en contraintes totales (Seed, 1979), ces paramètres sont déduits indirectement à l'aide d'essais en laboratoire reproduisant les conditions réelles.

(7) Exécution d'un calcul de stabilité utilisant le concept de l'équilibre limite, après passage du séisme, en tenant compte des pressions interstitielles développées pendant le séisme. Dans ce calcul, on suppose que la valeur limite inférieure de la résistance au cisaillement sur une surface de rupture est définie par la résistance en régime permanent, quelles que soient les pressions interstitielles calculées dans le calcul dynamique aux éléments finis. Les valeurs empiriques de la résistance résiduelle proposées par Seed sont parfois très inférieures aux valeurs déterminées en laboratoire, en régime permanent (Seed, 1987; Seed et Harder, 1990); il appartient donc au projecteur d'exercer son jugement pour le choix de la valeur à adopter (Lo *et al.*, 1991).

(8) Normalement, la stabilité du barrage est définie par un coefficient de sécurité. Ainsi, lorsque le calcul de stabilité utilisant le concept de l'équilibre limite, après séisme, indique un coefficient peu supérieur ou inférieur à 1, on prévoit des mesures correctives pour amener sa valeur à un niveau acceptable. Lorsque cette stabilité est définie en termes de déformations, il convient d'évaluer les déformations subies par le barrage. Dans ce cas, on peut utiliser un logiciel tel que TARA-3FL (Finn et Yogendrakumar, 1989) pour l'évaluation des déformations après séisme et des mesures nécessaires destinées à limiter celles-ci (Finn *et al.*, 1990). En cas de liquéfaction localisée, ce logiciel ajuste la valeur de la résistance au cisaillement des matériaux présents dans ces zones à la valeur de la résistance en régime permanent (ou résistance résiduelle). De plus, il modifie la géométrie du barrage en fonction des déformations progressives provoquées par l'inertie et les accélérations.

Il est évident qu'un calcul dynamique complet et détaillé est une tâche lourde, nécessitant une grande base de données et des connaissances spéciales. Pour ces raisons, de tels calculs sont réservés aux grands barrages de stériles dont la rupture risquerait de provoquer de grands dégâts en termes de vies humaines, de biens et

(1) Determine the static and dynamic properties of the soils comprising the dam and its foundation.

(2) Subject representative samples of the soils to laboratory tests simulating the combined effects of the initial static stresses and the superimposed dynamic stresses and determine their effects in terms of the generation of pore water pressures and the development of strains.

(3) Determine the static, pre-earthquake stresses within the dam.

(4) Determine the time history of base excitation to which the dam and its foundation may be subjected by the design earthquake.

(5) Determine the dynamic response for the dam and its foundation to the seismic loading from Step 4 above.

(6) If Step 5 is conducted using a true non-linear effective stress method of analysis such as TARA-3 (Finn and Yogendrakumar 1987), all response parameters such as earthquake-induced pore pressure and deformation are obtained directly. If conventional equivalent linear total stress analysis (Seed 1979) is used, the relevant response parameters are deduced indirectly with the aid of the laboratory tests which simulate the field conditions.

(7) Carry out a post-earthquake limit-equilibrium stability analysis including pore pressures developed during the earthquake. In making this post-earthquake analysis it is also assumed that the lower limiting value of the shear strength along a failure surface is defined by the steady-state strength regardless of the pore pressure values calculated from the dynamic finite element response analysis. Seed's empirical values for residual strength (Seed, 1987; and Seed and Harder, 1990) may be considerably lower than the laboratory determined steady-state values, thus requiring engineering judgements in selection of a design value (Lo *et al.*, 1991).

(8) Usually, factor of safety criteria are used to define the safety of the dam. Thus, when the post-earthquake limit-equilibrium stability analysis indicates a safety factor near or below unity, remedial measures are required to raise the factor of safety to an acceptable level. Sometimes deformation criteria are adopted, the deformation performance of the dam must be estimated. In such cases, programs like TARA-3FL (Finn and Yogendrakumar 1989) may be used to estimate post-earthquake deformation and the degree of remediation required to limit the deformation to acceptable amounts (Finn *et al.*, 1990). Such a program adjusts the shear strength of materials in localized liquefied zones to a value corresponding to its steady-state (or residual) strength. Furthermore, it updates the dam geometry to incorporate the progressive deformation developed due to inertial and gravitational loadings.

Obviously, a complete and detailed dynamic analysis is a major undertaking which requires an extensive data base and specialized skills. For these reasons such analyses should be reserved for major tailings dams where failure would pose a serious threat to life, property and environment and where the staged assessment

d'environnement, et lorsque les deux premières étapes ont montré qu'une étude plus poussée de stabilité est nécessaire.

Le calcul linéaire pseudo-dynamique en contraintes totales est utilisé depuis deux décennies pour l'évaluation de la stabilité générale des barrages sous sollicitations sismiques. Un grand nombre d'études de cas ont été collectées à ce jour. Cet ensemble représente une base de références très utile au projeteur. Récemment, on a appliqué un calcul dynamique non-linéaire en contraintes effectives, avec hystérésis (TARA-3 ou sa variante TARA-3 FL) pour l'évaluation du comportement sismique des barrages de stériles (Finn *et al.*, 1988; Scott *et al.*, 1989; Vick *et al.*, 1993) et des barrages hydrauliques (Finn, 1990). Des logiciels du même genre, proposés par d'autres auteurs (Aubry *et al.*, 1991; Zienkiewicz et Xie, 1991; CIGB, 1991, 1992b, 1994) ont également été utilisés pour le calcul *a posteriori* de cas réels. Le développement de cette méthode et, dans l'avenir, la multiplication des recouplements avec des comportements sismiques observés renforceront nos connaissances pour l'évaluation du comportement dynamique réel des barrages de stériles lors d'un séisme important. En raison des progrès continus dans les logiciels utilisés pour les calculs de stabilité, il est nécessaire de suivre ces progrès et de s'assurer qu'on en tient compte dans les études de projets.

involving the first two steps has indicated that a more detailed review of the stability problem is required.

The total stress equivalent linear dynamic analysis has been used for the last two decades to assess the overall stability of dams under seismic loadings. Numerous case histories involving analyses of existing dams have been accumulated to date. This body of work provides an invaluable reference base for the designer. An effective stress non-linear hysteretic dynamic analysis, TARA-3 or its variation TARA-3FL, have recently been applied to assess seismic performance of tailings dams (Finn *et al.*, 1988, Scott *et al.*, 1989; and Vick *et al.*, 1993) and water-retention dams (Finn 1990). Similar programs developed by others (Aubry *et al.*, 1991; Zienkiewicz and Xie, 1991; ICOLD 1991, 1992b and 1994) have also been used to back-analyze known case histories. With increasing usage of this method, and more extensive calibrations with actual earthquake performances of dams in the future, more insight will be gained in assessing how a tailings dam actually behaves dynamically during a severe earthquake. Since there are continual development and upgrade in computer programs used for stability analyses, it is necessary to follow this ongoing development to ensure that important, recent advancements are incorporated in a project assessment.

6. MESURES CORRECTIVES POUR L'AMÉLIORATION DE LA SÉCURITÉ DE BARRAGES EXISTANTS

Le chapitre 4.7. du Manuel (CIGB, 1982) présente les mesures correctives générales concernant des barrages de stériles en construction ou en exploitation. Ici, on aborde les situations découlant de l'évaluation de la stabilité sismique d'un ouvrage existant. En effet, cette évaluation peut démontrer la nécessité de mesures correctives pour améliorer la tenue et la sécurité de l'ouvrage. Chaque ouvrage étant différent par son contexte naturel, les contraintes d'exploitation de la mine et les conditions à l'aval (développement, environnement), ces mesures correctives doivent impérativement être adaptées à chaque aménagement. Néanmoins, on peut les grouper dans trois catégories principales :

- (1) construction d'un nouveau barrage,
- (2) renforcement du barrage existant,
- (3) protection de la zone aval.

6.1. CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU BARRAGE

Bien que généralement assez onéreuse, cette solution extrême est parfois indiquée dans les cas suivants : (1) les stériles stockés renferment des minerais primaires et/ou secondaires susceptibles d'être récupérés économiquement par les méthodes modernes de broyage compte tenu des progrès technologiques et de la valeur marchande croissante du produit final; (2) les coûts (tangibles et intangibles) résultant de la rupture du barrage sont très élevés par rapport au coût de réalisation d'un nouveau barrage, compte tenu de la population implantée à l'aval, de la croissance de l'activité économique, ou des considérations écologiques; (3) l'expansion éventuelle des opérations minières justifie la réalisation d'un ou plusieurs nouveaux barrages avec augmentation notable de la capacité de stockage.

Dans ces cas, l'étude du nouveau barrage doit examiner comment le barrage existant peut intervenir au mieux pour accélérer la construction et la mise en exploitation. Selon la topographie du site, les conditions de fondation et le volume utile demandé, le (ou les) nouveau(x) barrage(s) est(sont) implanté(s) juste à l'aval du barrage existant, ou sur un site vierge.

6.2. RENFORCEMENT DU BARRAGE EXISTANT

D'une façon ou d'une autre, le renforcement du barrage existant reste souvent la solution la plus pratique et économique. Avant l'étude du programme des mesures à prendre, on considère les éléments suivants :

6. REMEDIAL MEASURES FOR IMPROVING SAFETY OF EXISTING FACILITY

Section 4.7 of the Manual (ICOLD 1982) addresses general remedial measures involved in ongoing construction and operation of tailings dams. This section deals with special situations from a seismic evaluation of an existing tailings facility. The evaluation may call for remedial measures to enhance the integrity and safety of the tailings structure. Because each tailings facility is unique in its natural setting, mining operational requirements, and constraints imposed by downstream development and environment, remedial measures are to be developed, by necessity, on a project-specific basis. However, these measures can be generically grouped into three main categories :

- (1) replacement by new dam(s);
- (2) improvement of existing dam(s); and
- (3) protection of downstream area.

6.1. REPLACEMENT BY NEW DAM

Although this option is generally rather costly and represents an extreme solution, it may be the best option under special circumstances such as : (1) when the impounded tailings contain primary and/or secondary minerals that could be economically re-processed by modern milling methods due to the combined effects of technological advance and appreciation in values of the end-product; (2) when the cost (both tangible and intangible) of an impoundment failure overshadows the cost of building a new impoundment as the result of downstream population growth, economic development and environmental concerns; and (3) when potential mining expansion could justify the deployment of new dam(s) which increases significantly the tailings storage capacity of the impoundment.

When such an opportunity exists, the design of the new tailings facility should include considerations on how to best use the existing facility for expediting the construction and operation of the new one. Depending on the topography of the impoundment, the foundation condition and the storage requirement, the new dam(s) could be sited immediately downstream of the existing dam(s), or entirely in a new location.

6.2. IMPROVEMENT OF THE EXISTING DAM

In one form or another, improving the existing tailings facility is often the most practical and economically viable option. Before devising a remedial plan, the following factors need to be considered :

(1) Comportement sismique du barrage existant

Les récents progrès du calcul sismique dynamique ainsi que l'observation du comportement réel de barrages de stériles soumis à des séismes nous renseignent sur le comportement probable d'un barrage existant soumis aux différents scénarios sismiques prévisibles pour le site. Le comportement le plus défavorable serait la rupture par glissement et submersion, avec lâchure des stériles et de l'eau à l'aval. Les comportements moins extrêmes, sans perte des matières stockées, sont notamment : affaissement des talus amont et aval, tassement et déplacements horizontaux, fissuration transversale et/ou longitudinale, renards, résurgences, fissuration de la plage côté amont du barrage. L'étude des mesures de renforcement du barrage existant est facilitée par la connaissance de son comportement probable lors du passage du séisme de projet.

(2) Nature des faiblesses du barrage

Les mesures correctives spécifiques sont dictées par la nature des faiblesses identifiées lors de l'évaluation sismique du barrage. Ces faiblesses comprennent notamment : zones de matériaux lâches, liquéfiables ou de faible résistance dans le corps du barrage et/ou sa fondation par suite d'un compactage insuffisant ou le choix de la méthode « amont » de construction; niveau élevé de la ligne de saturation par suite d'un drainage insuffisant ou le choix de la méthode « amont » de construction; talus trop raides; revanche insuffisante; largeur de plage insuffisante; etc.

Les difficultés relatives au renforcement d'un barrage de stériles existant concernent souvent : (1) zones profondes de caractéristiques médiocres dans le barrage et/ou sa fondation, ce qui rend leur traitement difficile et onéreux; (2) vices de conception ou de réalisation difficilement corrigibles sans interventions importantes et onéreuses. La connaissance parfaite des faiblesses inhérentes est une nécessité préalable à la définition des solutions possibles.

(3) Situation du barrage existant par rapport à sa hauteur finale

Plus le barrage est éloigné de sa hauteur finale, plus il y a de marge de manœuvre. Lorsqu'il s'agit d'un barrage dont la construction vient de commencer, on a une grande marge de liberté pour modifier le parti en vue de corriger ses faiblesses inhérentes. A ce stade précoce, le coût de renforcement de la zone de faiblesse peut être raisonnable. De plus, on peut modifier à la fois la conception et la construction de la partie restant à exécuter, afin de minimiser l'influence des faiblesses existantes et de rendre satisfaisant le comportement du barrage final.

Les mesures correctives applicables sont les suivantes :

(1) Amélioration des conditions d'exploitation de l'ouvrage

Lorsqu'un barrage de stériles subit des désordres ou de grandes déformations sous l'effet d'un séisme, c'est souvent de la revanche et de la largeur minimale de la place amont que dépendent le risque de submersion par la retenue et de rupture du

(1) Predicted Potential Seismic Behaviour of the Existing Dam

Recent advances in dynamic response analysis as well as observations of past performances of tailings dams tested by actual earthquakes provide us with insights into potential seismic behaviour of an existing dam under various possible earthquake scenarios pertinent to the site. The worst behaviour would be a dam failure in a form of flow slide followed by the breach of the tailings impoundment with ensuing loss of stored tailings and water into downstream areas. Less severe behaviour involving no release of any stored solids or water include: slumps of upstream and downstream dam slopes, settlement and horizontal movement of the tailings dam, development of transverse and/or longitudinal cracks in the tailings dam, development of sand boils, water spouts and cracks in the tailings beach upstream of the dam. Design for improvement of the existing facility would be assisted by the understanding of its anticipated behaviour in a design earthquake event.

(2) Nature of Weakness in the Tailings Structure

Specific remedial measures are dictated by the nature of weakness identified in the seismic assessment of the tailings structure. These weaknesses consist of: inclusion of zones of loose and liquefiable or weak materials within the dam and/or its foundation due to a lack of compaction or the selection of upstream construction methods; high phreatic surface due to inadequate drainage provisions or the selection of upstream construction methods; steep dam slopes; inadequate height of freeboard; and inadequate width of tailings beach, etc.

The difficulty involved in improving the existing tailings dam(s) often relates to: (1) weak zones within the dam and/or its foundation occurring at depth, making the access and treatment of such a zone both difficult and costly; (2) inadequate design and construction procedures which may not be easily corrected without implementation of major and costly measures. A full understanding of the nature and extent of the built-in weaknesses is a prerequisite for defining the options for corrective action.

(3) Relative Size of the Existing Dam Versus its Ultimate Dimension

The smaller the relative size of the existing dam, the more flexible the situation is. When one is dealing with a dam at its early stages of development, there is a considerable degree of freedom in modifying the overall design to cope with the built-in weakness. At this stage, the cost of improving the weak zone may still be manageable. Furthermore, both the design and construction of the remaining portion of the dam can be modified to minimize the influence of the existing weakness, and rendering the overall performance of the ultimate dam satisfactory.

Corrective action, in general, includes one or a combination of more than one of the following alternatives:

(1) Improving Tailings Impoundment Operational Conditions

When a tailings dam suffers distress or substantial deformation because of an earthquake, the available freeboard and the minimum width of the tailings beach upstream of the dam could be the deciding factor in determining whether or not

barrage par érosion. Pour cette raison, on peut imposer des contraintes d'exploitation (eau et stériles) afin d'augmenter la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture du barrage.

(2) Amélioration de la partie aval non construite

Pour un barrage en cours de réalisation, son comportement sismique peut être fondamentalement amélioré en renforçant la partie aval restant à construire. Les travaux à entreprendre comprennent : traitement de la fondation; adoucissement des talus du barrage; drainage et compactage. Selon l'importance relative de la partie inachevée, une recharge aval stabilisatrice est parfois nécessaire pour compenser les faiblesses existantes. Un avantage important de cette solution est que le coût de l'amélioration aval peut être étalé sur les années du surélévation du barrage par la méthode aval (ou de l'axe central). Ainsi, la résistance sismique globale du barrage peut être améliorée par incréments suivant une augmentation nominale du coût annuel de la construction.

(3) Densification ou traitement de la zone de faiblesse existante

Les méthodes de traitement (densification) des sols *in situ* comprennent notamment : diverses techniques de compactage profond par vibration au moyen de sondes spéciales, avec ou sans produits de remplissage; compactage au moyen de pieux, compactage par explosifs ou consolidation dynamique; injections. Les caractéristiques et les applications de ces méthodes furent étudiées récemment par l'ASCE (1987) et par Mitchell (1988). Ces méthodes sont onéreuses. Chacune exige des études complètes et un programme d'essais en grandeur nature afin de s'assurer de l'efficacité des dispositions avant mise en œuvre. Un programme de contrôle de la qualité, composante essentielle de toute méthode de traitement, est nécessaire pour s'assurer que les valeurs imposées sont atteintes : résistance à la pénétration, vitesse sismique transversale, etc.

Le renforcement du barrage par modification de son profil aval ou par traitement *in situ* étant très onéreux, il convient d'étudier plusieurs variantes afin de rechercher l'action corrective la plus économique. Les méthodes modernes de calcul dynamique sont des outils précieux pour guider la recherche de la solution optimale. Cependant, en attendant la preuve de la validité de ces méthodes par comparaison avec des cas réels de barrages soumis à des sollicitations sismiques importantes, leur application est à tempérer avec une bonne dose de jugement et de prudence.

6.3. PROTECTION DE LA ZONE AVAL

Dans certains cas où le coût des deux approches ci-dessus est prohibitif, il est parfois plus économique et plus efficace d'accepter le risque de rupture du barrage. Cette option est à considérer en dernier recours, et seulement si l'impact sur l'environnement est minime. Des études sur les coulées de boue (Lucia, 1981; Jeyapalan, 1983a et 1983b; Vick, 1991; Hungr, 1994) et la propagation de l'onde de crue (Fread, 1984) sont nécessaires pour identifier les zones sensibles à l'aval. L'étude des mesures de protection contre les dommages provoqués par les résidus et les inondations à l'aval fait partie intégrante du projet d'amélioration.

the impounded supernatant water would escape and cause ensuing dam breach by erosion. Consequently, constraints on water management and tailings operation may be invoked to increase the safety margin against the impoundment failure.

(2) Improving the Downstream Unbuilt Portion of the Dam

For a tailings dam undergoing construction, fundamental improvement of its seismic performance can be effected by improving the downstream unbuilt portion of the dam. This entails : proper foundation preparation, flattening the dam slopes, incorporating drainage and compaction provisions. Depending on the relative size of the finished portion of the dam, a downstream buttress berm may be required to compensate for the existing weakness. An important advantage of this alternative is that the cost of downstream improvement can be spread out over the construction years of raising the dam by the downstream (or centreline) method. Thus, the overall seismic resistance of the dam can be enhanced incrementally with a nominal increase of the annual construction cost.

(3) Densifying or Improving the Existing Weak Zone

In situ soil densification and improvement methods include : various deep vibratory compaction techniques using specialized probes with or without special backfills, compaction piles, controlled blasting, dynamic compaction, and injection grouting. The characteristics and applications of these methods were recently reviewed by ASCE (1987) and Mitchell (1988). These methods are expensive. Each of these methods requires a thorough investigation and prototype testing program to check the effectiveness of the proposed design before its application. A quality control program, an essential part of all soil improvement methods, is necessary to ensure that the specified indices of successful remediation such as penetration resistance, shear wave velocity, etc., are met.

Because dam strengthening work involving modification of the downstream section or in situ soil improvement is very costly, it is important to examine various alternatives in order to find the most cost-effective remedial measure. Advanced dynamic analyses can be useful tools in guiding the search for such an optimal option. However, until the success of these new tools are demonstrated by case histories involving actual tailings dam experience in major earthquakes, their application should be tempered with sound engineering judgement and an appropriate degree of conservatism.

6.3. PROTECTION OF DOWNSTREAM AREA

In special situations where the cost of the above two approaches is prohibitive, it may be more economical and effective to consider the option of accepting the risk of possible failure of a tailings impoundment. This option should be considered as the last resort, and only if environmental impact is minimal. Tailings runoff (Lucia 1981; Jeyapalan 1983a and 1983b; Vick 1991; and Hungr 1994) and flood inundation studies (Fread 1984) should be carried out to map the extent of potentially vulnerable areas downstream. Engineering protective measures against damages from debris flow and flood downstream should be considered as part of the overall remedial scheme.

7. RÉSUMÉ

Le Bulletin présente une synthèse des aspects sismiques de la conception et de l'évaluation du comportement des barrages de stériles. Il contient des références à des publications de la CIGB et à des documents récents, permettant d'obtenir des informations détaillées sur les divers sujets traités. Les principaux sujets examinés sont :

- comportement sismique des barrages de stériles;
- évaluation de la sismicité;
- étude géotechnique;
- conception et construction des barrages de stériles;
- calcul de stabilité sismique;
- mesures correctives pour l'amélioration de la sécurité de barrages existants.

Le Bulletin a pour objet de donner des recommandations pour la conception sismique des nouveaux barrages et le renforcement de barrages existants. Il indique les diverses questions sismiques à examiner par les ingénieurs et les autorités responsables du projet ou de l'évaluation du comportement des barrages de stériles. La technique de ce type d'ouvrage continuant à évoluer, il importe de suivre les progrès et d'en tenir compte dans les nouvelles applications. Comme c'est le cas dans la plupart des domaines techniques, celui des barrages de stériles est continuellement en évolution. Au fur et à mesure que de nouvelles connaissances seront acquises sur les divers aspects de la conception sismique des barrages de stériles, certaines méthodes décrites dans le Bulletin changeront donc. Cependant, les concepts fondamentaux relatifs à la conception sismique, comme l'indique le Bulletin, resteront valables.

7. SUMMARY

This bulletin presents a brief review of seismic aspects of the design and evaluation of tailings dams. References to relevant ICOLD publications and recent literature are made to facilitate further in-depth investigation on each aspect. The main aspects covered in the bulletin are :

- seismic performance of tailings dams;
- seismicity assessment;
- geotechnical evaluation;
- design and construction of tailings dam;
- seismic stability analysis; and
- remedial measures to improve the safety of existing tailings dam.

The presentation is intended to give guidelines for seismic design of new dams and upgrading existing dams. The bulletin outlines a full spectrum of seismic related issues for consideration by engineers or officials responsible for seismic design or evaluation of tailings dams. Since the state-of-the-art of tailings dam engineering continues to evolve, progress in all aspects covered here should be followed closely to ensure the application of latest developments. As is the case for most fields of engineering, tailings dam engineering is a continually evolving field. Consequently, as new knowledge is developed concerning all aspects of the seismic design of tailings dams, some of the procedures described in this bulletin will change. However, the basic concepts relating to seismic design, as outlined in the bulletin, should remain valid.

8. REFERENCES

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (1987). "Soil Improvement - A Ten Year Update"; Geotech. Special Publ. No. 12.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1984). "Standard Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils"; ASTM D1586-84.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1986). "Standard Method for Quasi-Static, Cone and Friction Cone Penetration Test of Soil"; ASTM D3441-86.
- AUBRY, D., BENZENATI, I. and MODARESSI, A. (1991). "A Coupled Static - Dynamic Strain and Pore Pressure Analysis for Embankment Dams"; Dam Engineering, 2(1), Jan., pp. 53-94.
- Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) (1994). "Guidelines on Risk Assessment"; January.
- BERTI, G., VILLA, F., DOVERA, D., GENEVOIS, R. and BRAUNS, J. (1988). "The Disaster of Stava/Northern Italy"; Proc. of Hydraulic Fill Structures Conference, ASCE, August, Fort Collins, Colorado, pp. 492-510.
- BIERSCHWALE, J. G. and STOKOE, K. H. (1984). "Analytical Evaluation of Liquefaction Potential of Sands Subjected to the 1981 Westmorland Earthquake"; Rept. GR-84-15, Civil Engrg. Dept., Univ. of Texas, Austin.
- BUREAU, G., VOLPE, R. L., ROTH, W. H. and UDAKA, T. (1985). "Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams"; Proc. of Symposium on Concrete Face Rockfill Dams -Design, Construction, and Performance, ASCE, Oct., pp. 479-508.
- CASTRO, G. (1969). "Liquefaction of Sands"; Harvard Soil Mechanics Series No. 81, Harvard University, Jan.
- CASTRO, G. (1991). "Determination of In-Situ Undrained Steady State Strength of Sandy Soils and Seismic Stability of Tailings Dams"; Proc. of Seminar on Seismic Design, Abandonment and Rehabilitation of Tailings Dams, Special Vol. of 9th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., pp. 111-134.
- CHIU, S.K.L., KANASEWICH, E. R. and PHADKE, S. (1986). "Three-dimensional Determination of Structure and Velocity by Seismic Tomography"; Geophysics, Vol. 51, pp. 1559-1571.
- CHIU, S. K. L. and STEWART, R. R. (1987). "Tomographic Determination of Three-dimensional Seismic Velocity Structure using Well Logs, Vertical Seismic Profiles, and Surface Seismic Data"; Geophysics, Vol. 52, pp. 1085-1098.
- CONLIN, B. H. (1987). "A Review of the Performance of Mine Tailings Impoundments Under Earthquake Loading Conditions"; Proc. of Vancouver Geotechnical Society Seminar on Earthquake Geotechnique, May.
- CORNELL, C. A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis"; Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 58, pp. 1583-1606.

- Corps of Engineers (1979). "Geophysical Exploration"; Engineering Manual EM 1110-1-1802, US Corps of Engineers.
- COTTIN, J. F., DELETIE, P., JACQUET-FRANCILLON, H., LAKSHMANAN, J., LEMOINE, Y. and SANCHEZ, M. (1986). "Curved Ray Seismic Tomography: Application to the Grand Etang Dam (Reunion Island)"; *First Break*, Vol. 4, pp. 25-30.
- DOBRY, R. and ALVAREZ, L. (1967). "Seismic Failures of Chilean Tailings Dams"; *J. Soil Mech. Found. Engrg. Div., ASCE*, 93(6), pp. 237-260.
- DUNNICLIFF, J. (1988). "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance"; John Wiley & Sons, Inc. 577 pp.
- FINN, W. D. L. and YOGENDRAKUMAR, M. (1987). "Centrifugal Modelling and Analysis of Soil-Structure Interaction"; *Proc. of 5th Can. Conf. on Earthquake Engrg.*, July, Ottawa, pp. 453-460.
- FINN, W. D. L., YOGENDRAKUMAR, M., LO, R. C. and YOSHIDA, N. (1988). "Direct Computation of Permanent Seismic Deformations"; *Proc. of 9th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Tokyo and Kyoto, Japan, August.
- FINN, W. D. L. and YOGENDRAKUMAR, M. (1989). "TARA-3FL - Program for Analysis of Liquefaction Induced Flow Deformations"; Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada.
- FINN, W. D. L., WOELLER, D. J. and ROBERTSON, P. K. (1989). "In situ Determination of Liquefaction Potential and Dynamic Soil Properties: A Regional Study in Richmond, B.C."; *Proc. of Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response*, 12th Int'l. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., August, Rio de Janeiro, pp. 135-142.
- FINN, W. D. L. (1990). "Seismic Analysis of Embankment Dams"; *Dam Engineering*, 1(1), Jan., pp. 59-75.
- FINN, W. D. L., YOGENDRAKUMAR, M., LO, R. C., and LEDBETTER, R. H. (1990). "Seismic Response Analysis of Tailings Dams"; *Proc. of ICOLD Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*, May, Sydney, Australia, pp. 7-33.
- FRANKLIN, A. G. and CHANG, F. K. (1977). "Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis"; *Misc. Paper S-71-17*, U.S. Corps of Engineers.
- FREAD, D. L. (1984). "DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model"; Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, July, 56 pp.
- HARDER, L. F. Jr. and SEED, H. B. (1986). "Determination of Penetration Resistance for Coarse-Grained Soils Using the Becker Hammer Drill"; *Rept. UCB/EERC-86/06*, Univ. of Calif., Berkeley, 118 pp.
- HARDER, L.F. Jr. (1988). "Use of Penetration Tests to Determine the Cyclic Loading Resistance of Gravelly Soils During Earthquake Shaking"; *Ph.D. Thesis (2 Vols.)*, Univ. of Calif., Berkeley, 456 pp.
- HARDER, L.F. Jr. (1991). "Performance of Earth Dams During the Loma Prieta Earthquake"; *Proc. of 2nd Int'l. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engrg. and Soil Dynamics*, St. Louis, Mar., Vol. 2, pp. 1613-1629.
- HARDER, L.F. Jr. (1992). "Investigation of Mackay Dam Following the 1983 Borah Peak Earthquake"; *Proc. of Conf. on Stability and Performance of Slopes and Embankments-II*, ASCE Geotech. Special Publ. No. 31, Vol. 2, pp. 956-972.

- HOUSTON, S. L., HOUSTON, W. N. and PADILLA, J. M. (1987). "Microcomputer-Aided Evaluation of Earthquake-Induced Permanent Slope Displacements"; *Microcomputers in Civil Engineering*, Elsevier Science Publishing Co.
- HUNGR, O. (1994). "A Model for the Runout Analysis of Rapid Flow Slides"; submitted to *Canadian Geotechnical Journal* for Publication.
- HVORSLEV, M. J. (1949). "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes"; ASCE, 521 pp.
- IDRISS, I. M. (1985). "Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice"; Proc. of 11th Int'l. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., August, San Francisco, Vol. 1, pp. 255-320.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1969). "General Considerations Applicable to Instrumentation for Earth and Rockfill Dams"; Bulletin, 21, 42 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1977). "Dams Risks to Third Parties"; Bulletin 29, 78 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1982). "Manual on Tailings Dams and Dumps". Bulletin 45, 237 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1983). "Seismicity and Dam Design"; Bulletin 46, 121 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1986). "Quality Control for Fill Dams"; Bulletin 56, 79 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1988a). "Dam Monitoring - General Considerations"; Bulletin 60, 69 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1988b). "Dam Design Criteria - The Philosophy of Their Selection"; Bulletin 61, 83 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1988c). "Inspection of Dams Following Earthquake - Guidelines"; Bulletin 62, 69 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1989a). "Bibliography - Mine and Industrial Tailings Dams and Dumps"; Bulletin 44a, 321 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1989b). "Monitoring of Dams and Their Foundations - State of the Art"; Bulletin 68, 327 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1989c). "Selecting Seismic Parameters for Large Dams - Guidelines"; Bulletin 72, 73 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1989d). "Tailings Dam Safety - Guidelines"; Bulletin 74, 107 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1991). "The Seismic Response of an Embankment Dam under Conditions of Both Low and Medium Levels of Seismic Loading"; First Benchmark Workshop - Numerical Analysis of Dams, Bergamo, Italy, May, pp. 511-660.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1992a). "Improvement of Existing Dam Monitoring - Recommendations and Case Histories"; Bulletin 87, 119 pp.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1992b). "Theme B - Static Analysis and Dynamic Response of an Embankment Dam"; Second Benchmark Workshop, Numerical Analysis of Dams, Bergamo, Italy, July, pp. 569-814.

- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1994). "Theme B2 - Dynamic Analysis of an Embankment under a Strong Earthquake"; Third Benchmark Workshop, Numerical Analysis of Dams, Paris, France, September.
- International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) (1988). "Standard Penetration Test (SPT) : International Reference Test Procedure"; Technical Committee on Penetration Testing, ISOPT 1, Orlando, Florida, 1 : pp. 3-26.
- ISHIHARA, K. (1984). "Post-Earthquake Failure of a Tailings Dam Due to Liquefaction of the Pond Deposit"; Proc. of Int'l. Conf. on Case Histories in Geotech. Engrg., May, St. Louis, Missouri, Vol. III, pp. 1129-1143.
- JEYAPALAN, J., DUNCAN, J. and SEED, H. B. (1983a). "Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams"; J. Geotech. Engrg., ASCE, 109(2), pp. 150-171.
- JEYAPALAN, J., DUNCAN, J. and SEED, H. B. (1983b). "Investigation of Flow Failures of Tailings Dams"; J. Geotech. Engrg., ASCE, 109(2), pp. 172-189.
- KAYEN, R. E., MITCHELL, J. K., SEED, R. B., LODGE, A., NISHIO, S. and COUTINHO, R. (1992). "Evaluation of SPT-, CPT-, and Shear Wave - Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data"; Proc. of 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter-Measures for Soil Liquefaction, Vol. 1, pp. 177-204.
- KLOHN E. J., MAARTMAN, C. H., LO, R. C. and FINN, W. D. L. (1978). "Simplified Seismic Analysis for Tailings Dams"; Proc. of ASCE Geotech. Engrg. Div. Speciality Conf. on Earthquake Engrg. and Soil Dynamics, Pasadena, California, June 19-21, Vol. I, pp. 540-556.
- LEE, M. K. W. and FINN, W. D. L. (1978). "DESRA-2 Dynamic Effective Stress Response Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary Including Assessment of Liquefaction Potential"; Soil Mechanics Series, No. 38, Dept. of Civ. Engrg. Univ. of British Columbia, Vancouver.
- LO, R. C., KLOHN, E. J. and FINN, W. D. F. (1988). "Stability of Hydraulic Sandfill Tailings Dams"; Proc. of ASCE Geotech. Engrg. Div. Speciality Conf. on Hydraulic Fill Structures, Fort Collins, Colorado, August, pp. 549-572.
- LO, R. C., KLOHN, E. J. and FINN, W. D. L. (1991). "Shear Strength of Cohesionless Materials Under Seismic Loadings"; Proc. of 9th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., August, Vina, Del Mar, Chile, Vol. 3, pp. 1047-1062.
- LO, R. C., and KLOHN, E. J. (1992). "Behavior of Embankment Dams in Earthquakes"; Proc. of Symposium on Geotechnique and Natural Hazards, May, Vancouver, Canada, pp. 273-279.
- LUCIA, P. (1981). "Review of Experiences with Flow Failures of Tailings Dams and Waste Impoundments"; Ph.D. Thesis, Univ. of Calif., Berkeley.
- LUM, K. K. Y. and YAN, L. (1994). "In-situ Measurements of Dynamic Soil Properties and Liquefaction resistances of Gravelly Soils at Keenleyside Dam"; Session on Ground Failure under Seismic Conditions II - Gravelly Soils, ASCE Fall Convention, Atlanta, Georgia.
- MCGUIRE, R. K. (1976). "FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis"; U.S. Geol. Survey Open File Rept. 76-67, 90 pp.

- MC GUIRE, R. K. (1978). "FRISK : Computer Program for Seismic Risk Analysis Using Faults as Earthquake Sources"; U.S. Geol. Survey Open File Rept. 78-1007, 71 pp.
- MC GUIRE, R. K., and ARABASZ, W. J. (1990). "An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis"; *Geotechnical and Environmental Geophysics* (Vol. 1 - Review and Tutorial), Edited by S.H. Ward, Society of Exploration Geophysicists, pp. 333-354.
- MARCUSSON, W. F. III, and FRANKLIN, A. G. (1979). "State of the Art of Undisturbed Sampling of Cohesionless Soils"; Misc. Paper No. GL-79-16, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, July.
- MARCUSON, W. F. III, BALLARD, R. F. and LEDBETTER, R. H. (1979). "Liquefaction Failure of Tailings Dams Resulting from the Near Izu Oshima Earthquake, 14 and 15 January, 1978"; Proc. of 6th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found., Engrg., Lima, Vol. 2, pp. 69-80.
- MITCHELL, J. K. (1988). "Densification and improvement of Hydraulic Fills"; Proc. of ASCE Geotech. Engrg. Div. Specialty Conf. on Hydraulic Fill Structures, Fort Collins, Colorado, August, pp. 606-633.
- MITCHELL, J. K. and TSENG, D. J. (1990). "Assessment of Liquefaction Potential by Cone Penetration Resistance"; Proc. of H. Bolton Seed Memorial Symposium, Berkeley, Calif., May, Vol. 2, pp. 335-350.
- National Research Council (NRC) (1984). "Safety of Dams - Flood and Earthquake Criteria"; Washington, D.C. 276 pp.
- NEWMARK, N. M. (1965). "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments"; *Geotechnique*, 15(2), pp. 139-160.
- POULOS, S. J. (1981). "The Steady-State of Deformation"; *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 107(5), pp. 553-562.
- PRATT, R. G. and WORTHINGTON, M. H. (1988). "The Application of Diffraction Tomography to Cross-hole Seismic Data"; *Geophysics*, Vol. 53, pp. 1284-1294.
- ROBERTSON, P. K. and CAMPANELLA, R. G. (1985). "Liquefaction of Sands Using the CPT"; *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 111(3), pp. 384-403.
- ROBERTSON, P. K., WOELLER, D. J. and FINN, W. D. L. (1992). "Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential under Cyclic Loading"; *Can. Geotech. J.*, 29 (4), pp. 686-695.
- SCHNABEL, P. B., LYSMER, J. and SEED, H. B. (1972). "SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites"; Report No. EERC 72-12, Univ. of Calif., Berkeley, Dec.
- SCOTT, M. D., LO, R. C., KLOHN, E. J., FINN, W. D. L. and YOGENDRAKUMAR, M. (1989). "Non-linear Dynamic Analysis of L-L Tailings Dam"; Proc. of 12th Int'l. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Aug., Rio de Janeiro, Vol. 3, pp. 1911-1914.
- SEED, H. B. and MARTIN, G. R. (1966). "The Seismic Coefficient in Earth Dam Design"; *J. Soil Mech. Fdn Div., ASCE*, Vol. 92, No. SM3, pp. 59-83.
- SEED, H. B. (1979). "Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth and Rockfill Dams"; 19th Rankine Lecture, *Geotechnique* 29(3), pp. 215-263.
- SEED, H. B. (1982). "The Selection of Design Earthquakes for Critical Structures"; *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 72, No. 6, Part B, pp. S7-S12.

- SEED, H. B., TOKIMATSU, K., HARDER, L. F. Jr. and CHUNG, R. M. (1985). "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations"; *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 111(12), pp. 1425-1445.
- SEED, H. B. and DE ALBA, P. (1986). "Use of SPT and CPT Tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Soils"; *Proc. of Specialty Conf. on the Use of In Situ Tests in Geotech. Engrg., Blacksburg, Va, ASCE Geotech. Special Publ. No. 6*, pp. 120-134.
- SEED, H. B. (1987). "Design Problems in Soil Liquefaction"; *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 113(8), pp. 827-845.
- SEED, R. B. and HARDER, L. F. Jr. (1990). "SPT-Based Analysis of Cyclic Pore Pressure Generation and Undrained Residual Strength"; *Proc. of H. Bolton Seed Memorial Symposium, Berkeley, Calif., May, Vol. 2*, pp. 351-376.
- SHIBATA, T. and TEPARAKSA, W. (1988). "Evaluation of Liquefaction Potentials of Soil Using Cone Penetration Tests"; *Soils and Foundations*, 28(2), PP. 49-60.
- SKEMPTON, A. W. (1986). "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation"; *Geotechnique*, 36(3), pp. 425-447.
- STEWART, R. A., KILPATRICK, B. L. and CATTANACH, J. D. (1990). "The Use of Becker Penetration Testing for Liquefaction Assessment of Coarse Granular Overburden"; *Proc. of 43rd Can. Geotech. Conf., Quebec, Vol. 1*, pp. 275-283.
- STOKOE, K. H. and NAZARIAN, S. (1984). "In Situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Waves"; *Proc. of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3*, pp. 31-38.
- STOKOE, K. H., ROESSET, J. M., BIRSCHWALE, J. G. and AOUAD, M. (1988). "Liquefaction Potential of Sands from Shear Wave Velocity"; *Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3*, pp. 213-218.
- SY, A. and CAMPANELLA, R. G. (1993). "Dynamic Performance of the Becker Hammer Drill and Penetration Test"; *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 607-619.
- SY, A. and CAMPANELLA, R. G. (1994). "Becker and Standard Penetration Tests (BPT-SPT) Correlations with Consideration of Casing Friction"; *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 343-356.
- SYKORA, D. W., KOESTER, J. P., WAHL, R. E. and HYNES, M. E. (1992). "Post-Earthquake Slope Stability of Two Dams with Liquefied Gravel Foundations"; *Proc. of Conf. on Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE, Geotech. Special Publ. No. 31, Vol. 2*, pp. 990-1005.
- TOKIMATSU, K., UCHIDA, A. and OH-OKA, H. (1989). "Evaluation of Liquefaction Potential Based on Shear Wave Velocity"; *Proc. of Disc. Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, 12th Int'l. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg., Rio de Janeiro*, pp. 151-156.
- TOKIMATSU, K., KUWAYAMA, S. and TAMURA, S. (1991). "Liquefaction Potential Evaluation Based on Rayleigh Wave Investigation and its Comparison with Field Behaviour"; *Proc. of 2nd Int'l. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engrg. and Soil Dynamics, St. Louis, Vol. 1*, pp. 357-364.
- TRONCOSO, J. H. (1989). "The Chilean Earthquake of March 3, 1985: Effects on Soil Structures"; *Proc. of Discussion Session on Influence of Local Conditions*

- on Seismic Response, 12th Int'l. Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., August, Rio de Janeiro, pp. 1-10.
- TRONCOSO, J. H., YASUDA, S. and RODRIGUEZ, F. (1990). "In situ Measurements of Pore Water Pressures During Earthquakes"; Pontificia University Catolica de Chile, DIE No. 90-10.
- United States Committee on Large Dams (USCOLD) (1993). "Tailings Dam Incidents"; draft, July.
- VALERA, J. E. and KANESHIRO, J. Y. (1991). "Liquefaction Analysis for Rubber Dam and Review of Case Histories of Liquefaction of Gravels"; Proc. of 2nd Int'l. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engr. and Soil Dynamics, Mar., Vol. 1, pp. 347-356.
- VICK, S. G. (1983). "Planning, Design and Analysis of Tailings Dams"; John Wiley and Sons.
- VICK, S. G. (1991). "Inundation Risk from Tailings Dam Flow Failures"; Proc. of 9th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Vina del Mar, Aug., Vol. 3, pp. 1137-1158.
- VICK, S. G., DOREY, R., FINN, W. D. L. and ADAMS, R. C. (1993). "Seismic Stabilization of St. Joe State Park Tailings Dams"; Proc. of Specialty Conf. on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, ASCE, Raleigh, North Carolina, Apr.
- WANG, W. (1984). "Earthquake Damages to Earth Dams and Levees in Relation to Soil Liquefaction"; Proc. of Int'l. Conf. on Case Histories in Geotech. Engr., Vol. 1, pp. 511-522.
- YOSHIDA, Y., KOKUSHO, T. and IKEMI, M. (1988). "Empirical Formulas of SPT Blow-Counts for Gravelly Soils"; Proc. of Penetration Testing 1988, Vol. 1, pp. 381-387.
- ZIENKIEWICZ, O. C. and XIE, Y. M. (1991). "Analysis of the Lower San Fernando Dam Failure under Earthquake"; Dam Engineering, 2(4), Nov., pp. 307-322.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : janvier 1995
N° 17036
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne



Computerized Archives on line

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004*



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>