

SELECTING SEISMIC PARAMETERS FOR LARGE DAMS.

Guidelines.

CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES POUR GRANDS BARRAGES.

Recommandations.

Bulletin 72



1989

Katse Dam (Lesotho)
Dynamic computation : 1st antisymmetric mode
By courtesy of Coyne & Bellier and Ecole Centrale de Paris
(Computer coding IFSS and ANIM).

*Barrage de Katse (Lesotho)
Calcul dynamique : 1^{er} mode antisymétrique
Avec l'aimable autorisation de Coyne & Bellier et
de l'École Centrale de Paris (code de calcul IFSS et ANIM).*

Final draft of the report prepared
by A. Bozovic, Committee Chairman
French version finalized by Y. Le May

*Texte final du rapport préparé
par A. Bozovic, Président du Comité
Version française mise au point par Y. Le May*

SELECTING SEISMIC PARAMETERS FOR LARGE DAMS.

Guidelines.

CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES POUR GRANDS BARRAGES.

Recommandations.

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

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON SEISMIC ASPECTS OF DAM DESIGN
COMITÉ DES ASPECTS SISMIQUES DES PROJETS DE BARRAGES
(1982-1988)

Chairman/Président

Great Britain/Grande-Bretagne
Yugoslavia/Yougoslavie

R. SEVERN (1)
A. BOZOVIC (2)

Members/Membres

Argentina/Argentine

C. AISIKS

Chile/Chili

G. NOGUERA (3)

China/Chine

H. CHEN

Egypt/Égypte

A. SHALABY (4)

Italy/Italie

A. CASTOLDI

Japan/Japon

C. TAMURA

Korea (Rep. of)/Corée (Rép. de)

Y. W. CHUN

Mexico/Mexique

M. ROMO

Norway/Norvège

K. HOEG (5)

Pakistan/Pakistan

A. AGHA (6)

Peru/Pérou

Dr. HUACO

Portugal/Portugal

J. Oliveira PEDRO (7)

C. FLORENTINO (8)

South Africa/Afrique du Sud

W. S. CROUCAMP

Switzerland/Suisse

B. GILG

USA/États-Unis

R. KRAMER (9)

J. L. EHASZ (10)

(1) Chairman/Président (1982-1987).

(2) Chairman/Président (1987-1988).
Member/Membre (1982-1987).

(3) Member since 1986/Membre depuis 1986.

(4) Member since 1985/Membre depuis 1985.

(5) Member since 1985/Membre depuis 1985.

(6) Member since 1986/Membre depuis 1986.

(7) Member until 1987/Membre jusqu'en 1987.

(8) Member since 1987/Membre depuis 1987.

(9) Member until 1985/Membre jusqu'en 1985.

(10) Member since 1985/Membre depuis 1985.

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
- 1. INTRODUCTION
- 2. PRINCIPAUX FACTEURS A CONSIDÉRER DANS L'ÉTUDE SISMIQUE
- 3. CHOIX DES SÉISMES POUR LES CALCULS
- 4. CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL
- 5. FACTEURS INFLUANT SUR LE CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL
- 6. RÉFÉRENCES
- 7. GLOSSAIRE

ANNEXE 1 - Liste des principaux facteurs à considérer dans l'étude sismique

ANNEXE 2 - Détermination des paramètres sismiques de calcul

CONTENTS

- FOREWORD
- 1. INTRODUCTION
- 2. PRIMARY FACTORS TO CONSIDER IN SEISMIC DESIGN
- 3. SELECTION OF EARTHQUAKES FOR ANALYSIS
- 4. SELECTION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS
- 5. FACTORS INFLUENCING THE SELECTION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS
- 6. REFERENCES
- 7. GLOSSARY

APPENDIX 1 - List of primary factors to consider in seismic design

APPENDIX 2 - Determination of seismic evaluation parameters

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCTION | 8 |
| 1.1. But | 8 |
| 1.2. Considérations préliminaires | 8 |
| 1.3. Domaine examiné | 10 |
| 2. PRINCIPAUX FACTEURS A CONSIDÉRER DANS L'ÉTUDE SISMIQUE | 14 |
| 2.1. Structure géologique régionale | 14 |
| 2.2. Histoire de la sismicité | 16 |
| 2.3. Structure géologique locale | 18 |
| 3. CHOIX DES SÉISMES POUR LES CALCULS | 22 |
| 3.1. Méthode générale | 22 |
| 3.2. Terminologie | 22 |
| 3.3. Exigences de l'évaluation sismique | 26 |
| 4. CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL | 30 |
| 5. FACTEURS INFLUANT SUR LE CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL | 34 |
| 5.1. Généralités | 34 |
| 5.2. Influence du niveau de risque sismique du site | 34 |
| 5.3. Influence du niveau de risque potentiel | 38 |
| 5.4. Influence du type de barrage | 42 |
| 5.4.1. Barrages en béton | 42 |
| 5.4.2. Barrages en remblai | 44 |
| 6. RÉFÉRENCES | 48 |
| 7. GLOSSAIRE | 51 |
| ANNEXE 1 - Liste des principaux facteurs à considérer dans l'étude sismique | 58 |
| ANNEXE 2 - Détermination des paramètres sismiques de calcul | 62 |

TABLE OF CONTENTS

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCTION | 9 |
| 1.1. Purpose | 9 |
| 1.2. Background | 9 |
| 1.3. Scope | 11 |
| 2. PRIMARY FACTORS TO CONSIDER IN SEISMIC DESIGN | 15 |
| 2.1. Regional geologic setting | 15 |
| 2.2. Seismic history | 17 |
| 2.3. Local geologic setting | 19 |
| 3. SELECTION OF EARTHQUAKES FOR ANALYSIS | 23 |
| 3.1. General approach | 23 |
| 3.2. Terminology | 23 |
| 3.3. Seismic evaluation requirements | 27 |
| 4. SELECTION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS | 31 |
| 5. FACTORS INFLUENCING THE SELECTION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS | 35 |
| 5.1. General | 35 |
| 5.2. Influence of seismic hazard rating for specific sites | 35 |
| 5.3. Influence of potential risk | 39 |
| 5.4. Influence of type of dam | 43 |
| 5.4.1. Concrete dams | 43 |
| 5.4.2. Embankment dams | 45 |
| 6. REFERENCES | 48 |
| 7. GLOSSARY | 54 |
| APPENDIX 1 - List of primary factors to consider in seismic design | 59 |
| APPENDIX 2 - Determination of seismic evaluation parameters | 63 |

AVANT-PROPOS

L'influence de la sismicité sur les barrages présente un intérêt constant pour la CIGB dans la plupart de ses activités. Un Comité de la CIGB a été créé en 1969 pour traiter de ces problèmes et deux Bulletins ont déjà été publiés :

« Considérations sur le Calcul Sismique des Barrages » en 1975 (Bulletin 27, Comité présidé par M. Nose) et « Sismicité et Conception des Barrages » en 1983 (Bulletin 46, Comité présidé par R. G. T. Lane).

L'étude de la sismicité d'un site de barrage est le sujet du premier chapitre du Bulletin 46, dans lequel on traite de façon sommaire le problème des données sismiques à utiliser dans les calculs de barrages.

En raison de l'importance donnée par la CIGB au choix des paramètres sismiques des grands barrages, le Comité des Aspects Sismiques des Projets de Barrages a été chargé d'étudier ce sujet. Le but était de faire le point de la technique actuelle dans ce domaine et de préparer des « Recommandations » en vue d'aider les projeteurs dans le choix de ces paramètres.

Un Sous-Comité a été constitué en vue d'ouvrir des discussions; le document « Recommandations pour le Choix des Paramètres Sismiques des Barrages », préparé par le Comité National des États-Unis (USCOLD) et publié en octobre 1985, a servi de base pour les discussions lors des réunions annuelles en 1986 et 1987. Des commentaires et des modifications ont été présentés par plusieurs pays (Argentine, France, Inde, Japon, Norvège, Pakistan et Yougoslavie).

Le projet définitif de rapport, tenant compte des contributions des pays susmentionnés, a été rédigé par le Président du Comité, discuté au cours de la réunion annuelle du Comité en 1988 et approuvé par la 56^e Réunion Exécutive.

Je tiens à remercier tous les Comités Nationaux et les Membres du Comité des Aspects Sismiques des Projets de Barrages qui ont contribué à la préparation des présentes « Recommandations » maintenant publiées comme Bulletin de la CIGB.

A. BOZOVIC
Président,
Comité des Aspects Sismiques
des Projets de Barrages

FOREWORD

The influence of seismicity on dams has been of constant interest to ICOLD throughout most of its activity. An ICOLD Committee was set up in 1969 to deal with the related problems and two Bulletins were released as a result :

“ A Review of Earthquake Resistant Design of Dams ” in 1975 (Bulletin no. 27, Committee chaired by M. Nose) and “ Seismicity and Dam Design ” in 1983 (Bulletin no. 46, Committee chaired by R. G. T. Lane).

The assessment of seismicity at a dam site was the topic in the first chapter of Bulletin no. 46 which summarily treated the problem of seismic input for dam analyses.

As a result of the importance and significance that ICOLD assigns to the selection of seismic parameters for large dams, its Committee on Seismic Aspects of Dam Design has been charged to treat this subject. The objective is to reflect the state of the art in this field and to prepare “ Guidelines ” which should help the designers to orient themselves in the matter of selecting the seismic input parameters concerning large dams.

A Sub-Committee was organized to initiate the discussions and the “ Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects ” (published in October 1985) prepared by the United States Committee on Large Dams (USCOLD) served as basis for discussion at annual meetings of the Committee in 1986 and 1987. Comments and proposed amendments were contributed by several countries (Argentina, France, India, Japan, Norway, Pakistan and Yugoslavia).

The final draft was then edited by the Chairman of the Committee (taking into consideration the mentioned contributions) and then discussed during the Committee’s annual meeting in 1988 and approved by the 56th Executive Meeting.

Thanks are extended to all National Committees and Members of the Committee on Seismic Aspects of Dam Design which contributed to the preparation of the “ Guidelines ” being now published as an ICOLD Bulletin.

A. Bozovic
Chairman,
Committee on Seismic
Aspects of Dam Design

1. INTRODUCTION

1.1. BUT

La préparation de la version préliminaire des présentes recommandations a été confiée au Comité des Tremblements de Terre du Comité des Grands Barrages des États-Unis (USCOLD) et le travail fut poursuivi par le Comité des Aspects Sismiques des Projets de Barrages de la CIGB, en vue :

(1) d'établir des « Recommandations » pour le choix des paramètres à utiliser dans le projet et le calcul sismiques et pour l'évaluation de la sécurité des nouveaux barrages et des barrages existants, ainsi que de leurs ouvrages annexes.

(2) d'améliorer et de rendre uniforme la prise en compte des aspects sismiques intervenant dans l'évaluation du comportement des barrages, entre Maîtres d'ouvrage, projeteurs et divers organismes concernés par la planification, le projet, la construction, l'exploitation, l'entretien et les règlements relatifs aux barrages.

L'emploi de paramètres sismiques significatifs est nécessaire pour l'évaluation satisfaisante de la sécurité des barrages vis-à-vis des séismes. Ces Recommandations ont pour but d'aider le Maître d'œuvre et le Directeur de projet dans le choix des paramètres sismiques pour les projets de barrages, tenant compte des exigences liées à la situation de l'ouvrage et au risque sismique associé, au projet retenu et au risque associé à l'ouvrage terminé. Un calcul sismique approprié ne remplace pas mais complète l'étude approfondie, l'adoption de matériaux de haute qualité, les méthodes de contrôle efficaces pendant la construction, la surveillance et l'auscultation continues du barrage terminé.

On doit souligner que, malgré les paramètres sismiques et les méthodes de calcul choisis, l'évaluation finale de la sécurité sismique du barrage dépend en général du jugement de l'Ingénieur et de son expérience acquise sur des ouvrages identiques (évaluation et prise en considération des méthodes nouvelles d'études et des résultats d'études récemment obtenus). On doit aussi tenir compte du fait que chaque ouvrage achevé et son environnement immédiat forment un système unique que l'on ne retrouve pas ailleurs.

1.2. CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

Les dégâts subis par les barrages et par leurs ouvrages annexes peuvent résulter du mouvement d'une faille traversant les fondations ou, plus probablement, des secousses du sol provoquées sur le site du barrage par un tremblement de terre situé à une certaine distance du barrage. Les présentes Recommandations concernent principalement les aspects « mouvements sismiques du sol », associés aux projets de barrages.

Les secousses du sol sont produites par le passage d'un ébranlement de l'écorce terrestre, comme par exemple une onde émanant d'une région de la croûte terrestre où le mouvement d'une faille s'est produit. L'estimation des mouvements du sol

1. INTRODUCTION

1.1. PURPOSE

The preparation of the draft for these Guidelines was undertaken by the Committee on Earthquakes of the United States Committee on Large Dams (USCOLD) and then transacted through the Committee on Seismic Aspects of Dam Design (ICOLD) :

- (1) to provide a guide for the selection of parameters to be used in the seismic design, analysis and safety evaluation of new or existing dams and their appurtenant structures.
- (2) to promote consistency in handling the earthquake aspects of dam performance evaluation among owners, designers and various organizations involved in the planning, design, construction, operation, maintenance and regulation of dams.

The use of meaningful seismic parameters is necessary to perform a satisfactory evaluation of the earthquake safety of dams. These Guidelines are intended to help the Engineer and Project Manager to select seismic evaluation parameters for dam projects, based on requirements mandated by the project location and its associated seismic hazard, the design selected, and the risk of the completed structure. Appropriate seismic evaluation is not a substitute for, but will complement the use of sound design, high quality materials, effective construction control procedures, and continuous surveillance and monitoring of the performance of the completed structure.

It should be emphasized that, regardless of the seismic parameters and methods of analysis selected, the final evaluation of the seismic safety of the dam usually depends on engineering judgement and previous experience with similar structures (evaluating and taking into consideration newly developed research methods and newly obtained research results), keeping in mind that each completed structure and its immediate environment form a unique system that is not duplicated elsewhere.

1.2. BACKGROUND

Damage to dams and their appurtenant facilities may result from direct fault movement across the dam foundation or, more likely, from ground motion induced at the dam site by an earthquake located at some distance from the dam. These Guidelines are mainly concerned with the ground motion aspects of dam design.

Ground motion is produced by the passage of a crustal disturbance such as a wave emanating from a region of the earth's crust where fault movement has occurred. The estimation of future ground motion requires consideration of a rapidly

exige la prise en compte d'un ensemble d'informations augmentant rapidement et l'intervention de plusieurs disciplines : géologie, géophysique, sismologie, géotechnique, génie civil, ... Malgré les progrès rapides des connaissances, de nombreuses incertitudes existent encore. Actuellement, la nature complexe du mouvement du sol peut être seulement estimée, de façon approximative, en utilisant des procédés relativement simples qui découpent les effets, ceux-ci étant en général reconnus, mais souvent insuffisamment compris. On peut donner comme exemples : la propagation de l'énergie sismique à partir du foyer d'un tremblement de terre, le comportement non linéaire des éléments rocheux et des dépôts de sols, l'influence d'un événement dans le champ proche ou dans le champ éloigné de l'épicentre, et l'interaction entre le barrage, la fondation et la retenue. La variation, dans l'espace, des mouvements du sol le long de la base du barrage est en général ignorée, principalement à cause du manque de données appropriées. Les recherches courantes sont orientées vers les analyses des effets sur les sites des barrages (déphasage de la charge, influence des couches géologiques, etc.). Cependant, les analyses de ces phénomènes pour les barrages de très grande longueur peuvent être effectuées en utilisant une partie des méthodes mises au point pour les grandes conduites d'adduction.

Les dégâts d'origine sismique subis par des barrages vont des petites fissures ou des tassements en crête, jusqu'à la rupture totale de l'ouvrage et la perte de la capacité de stockage du réservoir. Toutefois, jusqu'à présent, aucun barrage en béton n'a subi une rupture catastrophique résultant d'un séisme. Dans plusieurs cas, les barrages affectés étaient situés à grande distance de la source de libération de l'énergie. Par conséquent, la nécessité de réaliser un projet résistant aux séismes ou de s'assurer pleinement que le site du barrage ne sera pas affecté par des séismes doit être examinée de très près.

L'étude basée sur les principes de résistance de l'ouvrage aux séismes est une pratique courante pour la plupart des nouveaux barrages, mais on n'en a pas tenu compte pour beaucoup de barrages anciens. Les études et reconnaissances portant sur les foyers sismiques régionaux et sur les conditions de fondation étaient souvent, dans le passé, moins approfondies que celles mises en œuvre dans la technique actuelle des barrages. L'utilisation de procédés de construction, aujourd'hui obsolètes, rend le comportement des barrages anciens plus difficile à estimer. La sécurité des nouveaux barrages doit être démontrée avant de les mettre en service; pour les barrages existants, on doit démontrer, avant de les mettre hors service, que leur sécurité n'est pas garantie. Cependant, il ne devrait pas y avoir de différence intrinsèque dans la méthodologie permettant de choisir les paramètres sismiques pour les projets de nouveaux barrages et pour l'évaluation de la sécurité des barrages existants. Généralement, des recommandations suffisamment conservatrices, telles celles proposées dans les pages suivantes, seront suivies afin de compenser les incertitudes et le manque de précision de l'estimation des secousses sismiques futures. De plus, l'expérience et le jugement dans les domaines de la géologie et de l'ingénierie continueront d'être des facteurs essentiels dans la détermination des paramètres sismiques qui soient à la fois conservateurs et réalistes.

1.3. DOMAINE EXAMINÉ

Le Bulletin contient des recommandations générales pour le choix des paramètres sismiques permettant de procéder à la révision de la sécurité des barrages

expanding body of information and the interaction of several disciplines, such as geology, geophysics, seismology, geotechnical and structural engineering. Although knowledge is progressing at a fast pace, numerous uncertainties still exist. Presently, the complex nature of ground motion can only be approximated through relatively simple processes that decouple generally recognized, but often insufficiently understood effects, such as the propagation of seismic energy away from the earthquake source, the non-linear behaviour of rock units and soil deposits, the influence of the near-field vs. the far-field event, and the interaction between the dam, foundation and reservoir. Spatial variations of the ground motion along the base of the dam have generally been ignored, primarily because of the lack of appropriate data. Current research is directed to analysing dam site effects (load phase shift, influence of geological strata, etc.). However, the analyses of these aspects for very long dams may be approached using part of the design methodology developed for large pipelines.

Historic occurrences of earthquake damage to dams have ranged from minor cracks or crest settlements to total failure and loss of the reservoir retention capacity, although to date no concrete dam has experienced catastrophic failure as the result of an earthquake. In several instances, the affected dams were located at large distances from the source of energy release. Hence, the need for either implementing earthquake-resistant design or fully documenting that a project site is aseismic cannot be overemphasized.

Design based on earthquake-resistant principles is standard practice for most new dams, but was not considered for many older dams. Investigations of regional earthquake sources and foundation conditions were often less extensive in the past than those required by modern dam engineering practice, and the use of construction procedures now obsolete make the performance of older dams potentially more difficult to assess. New dams should be shown to be safe before being placed in service, while existing dams should be shown to be unsafe before being taken out of service. However, there should be no intrinsic difference in the methodology necessary to select earthquake parameters for the design of new structures or for the safety evaluation of older dams. Generally, consistent and sufficiently conservative guidelines, as proposed in the following pages, should be followed to compensate for the uncertainties and the lack of accuracy associated with estimating future earthquake ground motion. Furthermore, geologic and engineering experience and judgement have been, and will continue to be essential factors, in determining seismic evaluation parameters that are both conservative and realistic.

1.3. SCOPE

This publication contains general guidelines for selecting seismic evaluation parameters to review the safety of existing dams and provide an earthquake resistant

existants et d'établir un projet parasismique pour tout nouvel ouvrage. Ces recommandations couvrent les sujets suivants :

- (1) Principaux facteurs à considérer dans l'étude sismique.
- (2) Choix des séismes pour les calculs.
- (3) Choix des paramètres sismiques de calcul.
- (4) Facteurs influençant le choix des paramètres sismiques de calcul.

design for any new structure. Such guidelines cover the following subjects :

- (1) Primary factors to consider in seismic design.
- (2) Selection of earthquakes for analysis.
- (3) Selection of seismic evaluation parameters.
- (4) Factors influencing the selection of seismic evaluation parameters.

2. PRINCIPAUX FACTEURS A CONSIDÉRER DANS L'ÉTUDE SISMIQUE

Les facteurs principaux qui régissent le choix des paramètres pour les études sismiques des projets de barrages dépendent des conditions géologiques et tectoniques du site du barrage et de ses abords. L'examen ci-après portant sur ces facteurs vise à être relativement complet. Mais l'ordre, l'étendue et les détails de cet examen doivent rester flexibles et s'adapter aux conditions locales, aux dimensions du barrage, à la destination de l'ouvrage et aux conséquences des dégâts ou d'une rupture totale. Le choix des paramètres sismiques pour l'évaluation de la sécurité d'un nouveau barrage ou d'un barrage existant est essentiellement un procédé par approximations successives, devant inclure, au minimum, les exigences indiquées dans les paragraphes ci-après. Comme référence et pour un aperçu rapide du problème, une liste des facteurs principaux à considérer dans les études sismiques est donnée dans l'Annexe 1.

2.1. STRUCTURE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE

Les études géologiques et sismiques considèrent, en premier lieu, les aspects régionaux et se concentrent ensuite sur les conditions locales du site. Une telle méthode est nécessaire pour comprendre la structure géologique générale et l'histoire sismique d'un site particulier. Certains sites exigent la prise en compte d'une grande surface pour l'étude régionale, afin d'englober toutes les particularités géologiques significatives et de considérer les conditions spécifiques, telles que l'atténuation du mouvement sismique du sol en fonction de la distance à partir de la zone de libération de l'énergie.

L'étude géologique régionale portera, au minimum, sur une zone d'un rayon de 100 km autour du site. Mais, dans plusieurs cas, la zone doit être augmentée jusqu'à un rayon de 300 km pour englober des failles importantes ou des caractéristiques spécifiques d'atténuation concernant une zone déterminée. Les données géologiques prises en considération comprendront :

- (1) Identification de la région physiographique et tectonique où le projet est situé.
- (2) Histoire géologique de la région du projet.
- (3) Description des formations géologiques, des types de roche et des dépôts de sols.
- (4) Situation des principaux accidents géologiques régionaux comprenant les plis, les réseaux de fractures et de diaclases. On tiendra compte également, dans l'étude, du chevauchement des principales structures géologiques régionales.
- (5) Interprétation des mécanismes tectoniques régionaux et des types de failles associées.
- (6) Situation et description des failles et des zones de cisaillement; on examinera si les failles peuvent produire des tremblements de terre ou subir des dépla-

2. PRIMARY FACTORS TO CONSIDER IN SEISMIC DESIGN

The primary factors that govern the selection of seismic design parameters for dam projects depend on the geologic and tectonic conditions at and in the vicinity of the dam site. The following discussion of such primary factors is intended to be relatively complete, but the order, format and detail in which they should be addressed should remain flexible and tailored to the local conditions, the size of the dam, the intended function of the structure and the consequences of damage or total failure. Essentially, the selection of seismic parameters for the evaluation of the safety of a new or existing dam is a step-by-step process that should include, as a minimum, the requirements described in the following paragraphs. For reference and quick overview of the problem, a list of primary factors to consider in seismic design is given in Appendix 1.

2.1. REGIONAL GEOLOGIC SETTING

Typical geology and seismicity studies consider the regional aspects, and then focus on the local site conditions. Such an approach is necessary to understand the overall geologic setting and seismic history of a particular site. Some sites require consideration of a large regional study area, in order to encompass all geologic features of significance and to account for specific conditions, such as attenuation of earthquake ground motion as a function of distance from the zone of energy release.

The regional geologic study area should cover, as a minimum, a 100 km radius around the site, but should in many cases be extended to as much as 300 km to include any major fault, or area-specific attenuation characteristics. The geological data reviewed should include :

- (1) Identification of the physiographic and tectonic province where the project is located.
- (2) Geologic history of the project area.
- (3) Description of geologic formations, rock types and soil deposits.
- (4) Location of major regional geological structural features including folds, and fracture or joint patterns. Imbrication of the major regional geological structures should also be considered as part of studying main features.
- (5) Interpretation of the regional tectonic mechanism(s) and associated type(s) of faulting.
- (6) Location and description of faults and shear zones and assessment of the capability of faults to generate earthquakes, or to be displaced by earthquakes. This

cements du fait des séismes. Cela comprendra une documentation sur l'existence ou l'absence d'activité sismique historique ou pré-historique (paléo-sismicité) de chaque faille.

(7) Estimation de l'activité de chaque faille revêtant une importance pour l'étude : glissement moyen, glissement lors de chaque événement, intervalle de temps entre les forts tremblements de terre, ...

L'étude des phénomènes particuliers suivants peut aussi présenter un intérêt :

(8) Étude du mouvement de magma et de laves, et de l'activité éruptive.

(9) Étude de la radioactivité et des courants de convection.

(10) Changement du champ de gravité et étude des anomalies de Bouger.

(11) Études géothermiques.

2.2. HISTOIRE DE LA SISMICITÉ

La compilation des données sur l'histoire de la sismicité aide à identifier les types de tremblements de terre dans une zone. Dans les régions où de nombreuses secousses sismiques ont eu lieu, elle fournit des éléments de base pour l'estimation des mouvements sismiques possibles sur le site considéré. Cela suppose que des événements identiques à ceux qui sont apparus dans le passé pourront se produire de nouveau au même endroit ou à proximité. Mais le manque de données historiques n'implique pas nécessairement que la région considérée n'est pas sismique.

Une grande importance doit être accordée aux enregistrements de séismes, quand de telles données sont disponibles. Des recueils complets des tremblements de terre sont conservés et tenus à jour dans différents pays par des organismes qualifiés; ils fournissent des informations sur les magnitudes et emplacements des séismes, et des détails sur les autres paramètres : profondeur du foyer, distance par rapport à un site de projet. Les listes figurant dans de tels recueils doivent être examinées avec soin quant à la précision, à l'état complet et à la consistance des données fournies. A l'échelle mondiale, des données sur les séismes peuvent également être fournies par des organismes internationaux.

Pour obtenir des informations qui n'ont pas été enregistrées par des instruments, il est parfois nécessaire de procéder à une recherche approfondie dans la littérature technique, les journaux et revues, auprès des sources privées et publiques d'informations sur les séismes, et de rassembler les événements historiques pour la région concernée par l'étude des failles, pouvant avoir eu des effets sur le site du barrage. La recherche des données sur l'histoire de la sismicité portera, au moins, sur une zone d'un rayon de 100 km, centrée sur le site du barrage. Dans la plupart des cas, elle couvrira la zone tectonique dans laquelle est situé le barrage, et également la zone de toutes les failles importantes, ce qui peut conduire à un rayon de plus de 100 km. Lorsqu'elles seront disponibles, les données suivantes seront prises en considération pour chaque événement :

- coordonnées de l'épicentre;
- magnitude (ou intensité à l'épicentre);
- date et durée de l'événement;
- profondeur du foyer;
- mécanisme au foyer;

should include documentation on the existence of or the lack of historic or pre-historic activity (paleoseismicity) for each fault.

(7) Estimation of the fault activity for each of the faults of concern to the study area (e.g., average slip rate, slip per event, time interval between large earthquakes, etc.).

Study of the following specific features might also be of interest :

(8) Study of movement of magma, lava and eruption activity.

(9) Radioactivity and convection current studies.

(10) Changes in gravitational field and Bouger anomaly survey.

(11) Geotherm studies.

2.2. SEISMIC HISTORY

Compilation of historical earthquake data helps to identify the seismicity patterns of an area and, in regions where numerous earthquakes have occurred, provides a basis for estimating the probability of possible future earthquake motion at the site considered. This is based on the assumption that events similar to those which have occurred in the past could reoccur at or near the same location. The lack of historic earthquakes, however, does not necessarily imply that the area considered is aseismic.

When available, emphasis should be given to recorded earthquake data. Comprehensive earthquake catalogs, maintained in different countries by a number of corresponding agencies, provide information on earthquake magnitudes, locations and details on other parameters, such as focal depth and distance from a specified project location. The listings in such catalogs should be carefully examined for accuracy, completeness and consistency of the data provided. On a world-wide basis sources of earthquake data also include international agencies.

To obtain data that has not been instrumentally recorded it is sometimes necessary to perform a thorough search of the technical literature, newspapers and journals, public and private sources of earthquake information and to catalog such historical events within the fault study area that may have had an effect on the dam site. The search for seismic history data should, as a minimum, cover a 100 km radius area centered at the dam site, but in most cases it should cover the tectonic province in which the dam is situated as well as including the area of all significant faults, which may extend well beyond the 100 km radius.

When available, the following data should be presented for each event considered :

- epicenter coordinates;
- magnitude (or epicentral intensity);
- date and time of occurrence;
- focal depth;
- focal mechanism;

- zone où l'événement a été ressenti;
- effets de surface accompagnants;
- intensité du mouvement du sol au site du barrage (connue ou estimée);
- degré de confiance;
- source des données.

Les cartes avec lignes d'égale intensité sismique, qui relient les points où des dégâts ou des effets sismiques identiques ont été constatés lors de tremblements de terre historiques, restent l'un des meilleurs moyens pour définir les fonctions d'atténuation de l'intensité, en l'absence d'autres données, malgré le fait que l'établissement de telles cartes est très subjectif.

L'histoire de la sismicité et les données géologiques peuvent être utilisées pour quantifier le niveau de l'activité sismique (nombre d'événements par an) dans la zone étudiée et, si possible, pour chaque faille active reconnue ou zone tectonique à l'intérieur de la région considérée. De préférence, les données sismiques historiques seront traitées statistiquement pour établir la relation fréquence-magnitude pour la région et, si possible, pour la faille, par exemple en reportant sur un graphique à l'échelle logarithmique le nombre d'événements, égaux ou supérieurs à une magnitude spécifique, en fonction de la valeur de cette magnitude. Les emplacements des épicentres peuvent être classés par ordre chronologique et par distance croissante à partir du site considéré. Un graphique des lieux des épicentres par rapport au site du barrage est recommandé, pour mieux représenter la localisation de la sismicité historique significative. La détermination du plan des failles à partir de l'activité microsismique peut indiquer l'activité des failles.

2.3. STRUCTURE GÉOLOGIQUE LOCALE

Des données géologiques spécifiques au site sont nécessaires pour définir certaines caractéristiques du mouvement du sol susceptible de se produire au site du barrage et pour estimer si un mouvement primaire ou de vibration d'une faille est possible à travers la fondation du barrage. Toute donnée géologique relative au site ou à ses environs, pouvant indiquer un mouvement récent d'une faille ou son activité sismique, sera soigneusement étudiée. Les caractéristiques géologiques locales sont obtenues par l'examen de documents, de rapports techniques concernant des ouvrages voisins, par des visites du site, des reconnaissances du terrain et des prélèvements et essais de matériaux. Ces données comprendront :

- (1) Définition du type, de l'étendue, de l'épaisseur, du mode de dépôt/formation et des caractéristiques de stabilité des masses rocheuses et des dépôts de sols.
- (2) Situation et chronologie des failles locales : importance et type des déplacements, estimés à partir des données historiques et stratigraphiques, époque de la dernière rupture, niveaux d'activité, de déformation, de glissement, etc., en utilisant des méthodes appropriées de mesures. Dans certains cas, l'emploi de techniques spéciales de reconnaissances (par exemple ouverture de tranchées et datation au carbone) peut être recommandé.
- (3) Interprétation de la structure géologique : orientation et espacement des diaclases, plans des couches, direction et pendage des unités géologiques, plis et matériaux d'intrusion et d'extrusion.

- felt area;
- accompanying surface effects;
- intensity of ground motion induced at the dam site (known, or estimated);
- reliability;
- source of data.

Intensity maps with isoseismal contours that link points of equal damage or felt earthquake effects during significant historical earthquakes remain one of the best ways to derive intensity attenuation functions in the absence of other data, despite the fact that the determination of isoseismals is highly subjective.

Seismic history and geologic considerations may be used to quantify the rate of seismic activity (number of events per year) for the study area and, if possible, for each recognized active fault or tectonic province within this area. Preferably, seismic history data should be statistically processed to develop regional and, if possible, fault-specific frequency-magnitude relationships, for example by plotting on the logarithmic scale the number of events equal to or larger than a specific magnitude against that magnitude value. Epicenter locations can be sorted by chronological order and by increasing distances from the site considered. A plot of earthquake epicenter locations in relation to the dam site is recommended to visually assess the location of significant historical seismicity. Fault plane solution based on microseismic activity may indicate activity of faults.

2.3. LOCAL GEOLOGIC SETTING

Site-specific geologic information is necessary to ascertain some of the characteristics of the ground motion expected at the dam site and to evaluate the potential for primary or sympathetic fault movement through the dam foundation. Any geologic condition at or near the site that might indicate recent fault movement or seismic activity should be thoroughly documented. Local geologic data are obtained through the review of literature, engineering reports applicable to nearby projects, site inspections, field exploration and material sampling and testing. They should include :

- (1) Definition of type, extent, thickness, mode of deposition/formation and stability characteristics of rock units and soil deposits.
- (2) Location and chronology of local faulting, including amount and type of displacements estimated from historic and stratigraphic data, time of last rupture, rates of activity, strain rates, slip rates, etc., using appropriate measurement methods. In some cases the use of special investigative techniques, such as trenching or carbon dating, may be indicated.
- (3) Interpretation of the structural geology including orientation and spacing of joint systems, bedding planes, dip and strike of geologic units, folds and intrusive or extrusive bodies.

- (4) Détermination des conditions hydrogéologiques : localisation de la nappe souterraine, pression et écoulement des eaux souterraines, perméabilités des formations rencontrées.
- (5) Estimation des éventualités de formation de seiches et de ruptures des versants de la retenue.
- (6) Détermination des conditions de fondations et d'appuis.
- (7) Inventaire des enregistrements des fortes secousses sismiques historiques qui se sont produites au voisinage du site ou dans des zones de structure géologique et tectonique identique.

- (4) Determination of hydrogeological conditions, including location of water table, underground water pressure and flow conditions, and permeability characteristics of the formations encountered.
- (5) Evaluation of potential for seiches and reservoir slope failures.
- (6) Determination of foundation and abutment conditions.
- (7) Inventory of strong-motion records from historical earthquakes that occurred near the site or in areas with similar geologic or tectonic setting.

3. CHOIX DES SÉISMES POUR LES CALCULS

3.1. MÉTHODE GÉNÉRALE

Pour les calculs, les tremblements de terre doivent être définis afin que des paramètres sismiques appropriés (magnitude, accélération, ordonnées spectrales, durée, etc.) puissent être choisis. Cela peut être réalisé en utilisant une méthode déterministe, ou une méthode probabiliste d'évaluation du risque sismique.

Dans la méthode déterministe (pratique courante en 1988) pour le choix des paramètres sismiques de calcul, la magnitude et la distance seront déterminées en identifiant les failles actives critiques qui montrent des signes évidents de mouvements dans l'ère Quaternaire; l'activité de ces failles est à préciser par une méthode appropriée, comme la relation entre la longueur de rupture et la magnitude, ou la relation entre le mouvement de la faille et la magnitude. Les distances entre le site et ces failles critiques doivent être connues pour évaluer les autres paramètres. Les paramètres appropriés sont alors obtenus en suivant la méthodologie résumée dans l'Annexe 2.

L'évaluation probabiliste du risque sismique quantifie numériquement la participation aux secousses sismiques, sur le site du barrage, de toutes les sources et magnitudes supérieures à un minimum fixé (en général, la magnitude de 4 ou 5 sur l'échelle de Richter) jusqu'à et y compris la magnitude maximale de chaque source. L'occurrence possible du séisme correspondant à chaque magnitude, en tout point d'une source (y compris au point le plus proche du site), est directement incorporée dans l'évaluation probabiliste du risque sismique (le paragraphe 5 de l'Annexe 2 donne un résumé d'une telle méthode d'évaluation).

3.2. TERMINOLOGIE

Il n'y a pas de terminologie universellement acceptée pour désigner les différents tremblements de terre qui sont retenus lors de la définition des niveaux de séismes pour lesquels un ouvrage doit être étudié ou évalué.

Le niveau du séisme au site du barrage dépend des conditions géologiques et tectoniques dans la région englobant le site de l'ouvrage et la source sismique. Par conséquent, ce niveau dépend de l'énergie libérée, du mécanisme à la source, de la longueur du parcours de transmission (et de l'atténuation correspondante) et de la géologie de surface au site du barrage.

On recommande deux définitions de séismes pour lesquels le barrage doit être projeté ou évalué. Le Séisme Maximal de Dimensionnement (SMD) et le Séisme de Base d'Exploitation (SBE). Les deux définitions dépendent du niveau de l'activité sismique qui se manifeste sur chaque faille, ou dans une région tectonique, et qui peut produire l'événement.

3. SELECTION OF EARTHQUAKES FOR ANALYSIS

3.1. GENERAL APPROACH

Earthquakes must be defined for analytical purposes so that appropriate seismic evaluation parameters (e.g., magnitude, acceleration, spectral ordinates, duration, etc.) can be selected. The latter process can be accomplished by using either a deterministic procedure, or a probabilistic seismic hazard evaluation.

In a deterministic procedure (the current practice as of 1988) for choosing seismic evaluation parameters, magnitude and distance should be ascertained by identifying the critical active faults which show evidence of movements in Quaternary time; the capability of these faults must be ascertained through the appropriate established methods such as the rupture length-magnitude relationship or the fault movement and magnitude relationship. The distance of these critical faults from the site should be known to evaluate the other parameters. The appropriate parameters are then obtained by following the methodology summarized in Appendix no. 2.

A probabilistic seismic hazard evaluation quantifies numerically the contributions to seismic motion, at the dam site, of all sources and magnitudes larger than a designated minimum (typically Richter Magnitude 4 or 5) up to and including the maximum magnitude on each source. The possible occurrence of each magnitude earthquake at any part of a source (including the closest location to the dam site) is directly incorporated in a probabilistic seismic hazard evaluation. Section 5 of Appendix 2 provides a summary of such an evaluation procedure.

3.2. TERMINOLOGY

There is no universally accepted terminology for designating the various earthquakes that are used in defining the levels of earthquake motion for which a structure should be designed or evaluated.

The level of the earthquake motion at the dam site depends on the geological and tectonic conditions in the region including the dam site and the earthquake source and consequently on released energy, source mechanism, length of transmission path (and related attenuation) and surface geology of the dam site.

Two definitions of earthquake for which the dam should be designed or evaluated are recommended : Maximum Design Earthquake (MDE) and Operating Basis Earthquake (OBE). Both depend on the level of seismic activity which is displayed at each fault or tectonic province with capability of originating the event.

La notion de Séisme Maximal Possible (SMP) est liée à chacune de ces deux définitions. C'est le plus grand tremblement de terre qu'on peut concevoir, de façon raisonnable, et qui paraît possible le long d'une faille reconnue ou dans une région tectonique, géographiquement définie, dans le système tectonique connu actuellement ou présumé. On définit généralement le SMP comme une limite supérieure de la magnitude prévue ou comme une limite supérieure de l'intensité sismique prévue.

Pour l'évaluation du Séisme Maximal Possible, il est possible d'appliquer la méthode déterministe ou la méthode probabiliste, comme cela est expliqué au paragraphe 3.1. Si la méthode déterministe est utilisée, on ne tient pratiquement pas compte de la période de retour d'un tel événement, car son occurrence dépend du milieu géologique considéré. Un des aspects tectoniques pris en considération sera de vérifier le niveau maximal du mouvement sismique susceptible de se produire sur le site du barrage.

Si on utilise l'évaluation probabiliste du risque sismique, le Séisme Maximal Possible est alors lié à une période de retour de cet événement très longue, avec une probabilité de 50 %, ou plus, de ne pas être dépassé durant un grand nombre d'années (voir Annexe 2).

Les deux méthodes mentionnées sont suivies et appliquées. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'indiquer quelle méthode doit être utilisée. Il est donc recommandé d'appliquer les deux et de se servir du jugement de l'Ingénieur pour évaluer l'événement maximal possible.

Dans le Bulletin 46 de la CIGB (Sismicité et Conception des Barrages) seuls SBD — Séisme de Base de Dimensionnement — (avec l'approche probabiliste) et SMP (avec l'approche déterministe) sont mentionnés. Dans les présentes recommandations, on a préféré suivre l'approche indiquée ci-dessus, étant donné que dans les Codes de certains pays la méthode déterministe pour le Séisme Maximal de Dimensionnement n'est pas appliquée.

Compte tenu de ces considérations, les niveaux sismiques pour lesquels le barrage doit être projeté et calculé, sont les suivants :

• **Séisme Maximal de Dimensionnement**

Le Séisme Maximal de Dimensionnement (SMD) produira le niveau maximal de secousses du sol, pour lequel le barrage doit être projeté et calculé. Pour les barrages dont la rupture constitue un grand danger social, le SMD sera normalement caractérisé par un niveau de secousses égal à celui qui est prévu au site du barrage, avec l'occurrence du SMP évalué de façon déterministe (comme défini auparavant) ou par le séisme défini par une méthode probabiliste (probabilité de 50 %, ou plus, de ne pas être dépassé au cours d'un grand nombre d'années). L'exigence minimale sera que le barrage soumis à cette charge sismique conserve sa capacité de stockage.

Si la rupture du barrage ne présente aucun danger pour les vies humaines, un niveau de secousses sismiques inférieur à celui associé au SMD peut être acceptable pour représenter le séisme de projet, en se basant sur d'autres considérations, telles que le coût du barrage projeté résultant d'un niveau de mouvement sismique déterminé et le coût de la rupture totale de l'ouvrage achevé. Il s'agit d'un cas spécial qui doit faire l'objet d'un accord de société.

With each of such earthquake generating features the notion of Maximum Credible Earthquake (MCE) is linked. This is the largest reasonably conceivable earthquake that appears possible along a recognized fault or within a geographically defined tectonic province, under the presently known or presumed tectonic framework. The MCE is generally defined as an upper bound of expected magnitude or as an upper bound of expected earthquake intensity.

To evaluate the Maximum Credible Earthquake it is possible to use a deterministic procedure or a probabilistic approach, as described in 3.1. If the deterministic procedure is used, the return period of such an event is practically ignored, as the occurrence depends on the geological environment considered. One of the considered seismically capable tectonic features will be controlling for the maximum level of earthquake motion to be expected at the dam site.

If the probabilistic seismic hazard evaluation is used then the Maximum Credible Earthquake is linked with a very long return period for this event (with 50 % or higher probability of not being exceeded in a large number of years - see Appendix 2).

Both approaches are being followed and applied. In the present state of knowledge it is not possible to affirm decisively which approach should be used. It is therefore recommended to use both and to apply engineering judgement while evaluating the maximum credible event.

In ICOLD Bulletin 46 (Seismicity and Dam Design) only DBE — Design Basis Earthquake — (with probabilistic approach) and MCE (with deterministic approach) are mentioned. In the present Guidelines it was considered better to follow the above explained approach since in the Codes of some countries the deterministic approach for the Maximum Design Earthquake is not applied.

With the foregoing background, the earthquake levels for which the dam should be designed and analysed should be as follows :

• **Maximum Design Earthquake**

The Maximum Design Earthquake (MDE) will produce the maximum level of ground motion for which the dam should be designed or analyzed. For dams whose failure would present a great social hazard, the MDE will normally be characterized by a level of motion equal to that expected at the dam site from the occurrence of deterministically evaluated MCE (as defined earlier) or of the earthquake determined by using probabilistic procedures, such as specifying 50 % or higher probability of not being exceeded in a large number of years. It will be required at least that the impounding capacity of the dam be maintained when subjected to that seismic load.

Should failure of the dam present no hazard to life, a level of motion less than that associated with the Maximum Design Earthquake may be acceptable to represent the Design Earthquake, based on alternative considerations such as the cost of the designed dam resulting from a specified level of motion and the cost of failure of the completed structure. This should be considered a special case and should be based on a socially accepted agreement.

• Séisme de Base d'Exploitation

Le Séisme de Base d'Exploitation (SBE) représente le niveau maximal de secousses du sol au site du barrage, pour lequel seulement des dégâts mineurs sont acceptables. Du fait de sa définition, le SBE est mieux déterminé en utilisant la méthode probabiliste, par exemple en spécifiant la probabilité de 50 % de ne pas être dépassé en 100 ans. En tout cas, ce niveau est sensiblement inférieur à celui correspondant au SMD. Le barrage, les ouvrages annexes et le matériel d'équipement devront rester en état de fonctionner et les dégâts seront faciles à réparer, quand l'occurrence des secousses sismiques ne dépasse pas celle correspondant au SBE.

Étant donné que les conséquences résultant d'un dépassement du SBE sont en général d'ordre économique, des circonstances particulières peuvent parfois justifier l'adoption d'un événement plus ou moins sévère pour le SBE. Les périodes de retour qui en résultent dépendent des conditions prévalant dans les divers pays.

• Séisme Induit par la Retenue

Le Séisme Induit par la Retenue (SIR) représente le niveau maximal du mouvement de sol susceptible d'être déclenché sur le site du barrage par le remplissage, la vidange, ou la présence de la retenue. Un nombre limité de cas de séismes induits par la retenue ont fait l'objet de rapports. L'étude détaillée de tels cas est recommandée. Cependant, les caractéristiques générales du milieu favorisant un SIR sont indiquées dans les paragraphes suivants.

On considère que le SIR est généralement lié aux barrages de hauteur supérieure à 100 m ou aux retenues de grande capacité (par exemple, supérieure à 500 hm³), et aussi aux nouveaux barrages de dimensions plus petites quand ceux-ci sont situés dans des zones tectoniques sensibles. Des différences d'opinion existent sur les conditions qui causent la sismicité induite par les retenues. Toutefois, une telle sismicité doit être considérée comme un événement susceptible de se produire, si la retenue considérée contient des failles actives dans la zone d'influence de son régime hydraulique et si la géologie régionale et locale, ainsi que les données sismiques dans la zone de l'influence du régime hydraulique de la retenue, indiquent une sismicité induite possible. Même si toutes les failles passant par la retenue ne sont pas tectoniquement actives, la possibilité de sismicité induite ne doit pas être totalement exclue si la géologie et la sismicité régionales et locales laissent à penser que la zone peut être exposée à la sismicité induite par la retenue.

Suivant l'emplacement du barrage et les conditions sismo-tectoniques prévalant, le SIR peut présenter un mouvement sismique inférieur, égal, ou supérieur au SBE. Mais, une conséquence pratique est que le SIR, en aucun cas, ne pourra être plus grand que le Séisme Maximal de Dimensionnement, et les failles susceptibles de donner lieu à la sismicité induite doivent être prises en considération lors de l'évaluation générale. Toutefois, une accélération des événements sismiques, causée par la mise en eau, peut se produire. Il est donc justifié, dans les cas des barrages et réservoirs relativement grands, d'observer les séismes de faible intensité avant, pendant et après la mise en eau, afin de suivre l'évolution de la sismicité induite.

3.3. EXIGENCES DE L'ÉVALUATION SISMIQUE

Les charges sismiques de base pour l'étude de nouveaux barrages, ou pour

- **Operating Basis Earthquake**

The Operating Basis Earthquake (OBE) represents the level of ground motion at the dam site at which only minor damage is acceptable. Because of its definition, the OBE is best determined by using probabilistic procedures; for instance, such as specifying a 50 % probability of not being exceeded in 100 years, in any case significantly lower than for MDE. The dam, appurtenant structures and equipment should remain functional and damage easily repairable, from the occurrence of earthquake shaking not exceeding the OBE.

Since the consequences of exceeding the OBE are normally economic, the circumstances in a particular case may justify use of a more severe or less severe event for the OBE. The resulting return period depends on prevailing conditions in different countries.

- **Reservoir-Induced Earthquake**

The Reservoir-Induced Earthquake (RIE) represents the maximum level of ground motion capable of being triggered at the dam site by the filling, drawdown, or the presence of the reservoir. There is a limited number of documented cases of reservoir induced earthquakes. Detailed study of such cases is recommended. However, general environmental features leading to RIE are detailed in the succeeding paragraphs.

The consideration of the RIE has been reported as generally linked to dams higher than about 100 m or to large reservoirs (capacity say greater than about 500 hm³) and to new dams of smaller size located in tectonically sensitive areas. While there exist differences of opinion regarding the conditions which cause reservoir-induced seismicity, it should be considered as a credible event if the proposed reservoir contains active faults within its hydraulic regime and if the regional and local geology and seismic record within the reservoir's hydraulic regime may be judged to indicate potential for reservoir-induced seismicity. Even if all the faults within a reservoir are considered tectonically inactive, the possibility of reservoir-induced seismicity should not be totally ruled out, if the local and regional geology and seismicity suggest that the area could be subject to reservoir-induced seismicity.

Depending on the dam location and prevailing seismotectonic conditions, the RIE may represent motion less than, equal to, or greater than the OBE. But of practical consequence is the fact that RIE should in no case be greater than the Maximum Design Earthquake and the faults susceptible to give rise to induced seismicity should be taken in consideration during the evaluation procedure. Still the result might be an acceleration of seismic events caused by impounding. It is therefore justified in case of larger dams and storages to introduce low seismicity observation prior, during and after impounding in order to monitor the evolution of the induced seismicity.

3.3. SEISMIC EVALUATION REQUIREMENTS

The basic seismic loads for the design of new dams or for the safety evaluation

l'évaluation de la sécurité des barrages existants, sont déduites du SMD et du SBE. Suivant les conditions, un barrage peut être calculé pour une seule ou pour les deux charges sismiques de base.

L'exigence principale dans le projet des barrages résistant aux tremblements de terre est d'assurer la sécurité publique, de protéger les vies et les biens. Par conséquent, la plupart des barrages doivent résister aux mouvements sismiques les plus sévères ou aux mouvements concevables des failles au site du barrage, sans qu'une perte non contrôlable des eaux de la retenue s'ensuive. Dans le cas du SMD, on peut accepter des dégâts, même importants, sur le barrage, à condition qu'une crue catastrophique ne se produise pas.

En plus de l'exigence principale susmentionnée, plusieurs facteurs interviennent dans l'évaluation de la sécurité vis-à-vis des séismes;

- (1) le niveau du risque sismique du site du barrage (voir paragraphe 5.2);
- (2) le type de barrage;
- (3) les exigences de fonctionnement;
- (4) le niveau de risque du barrage et de la retenue terminés (voir paragraphe 5.3);
- (5) les conséquences d'une surestimation ou sous-estimation du risque.

La décision de calculer le barrage pour le SMD, le SBE et/ou pour le SIR doit être prise conjointement par le Maître d'Ouvrage, son Ingénieur Conseil et les organismes de contrôle, en tenant compte beaucoup de l'opinion publique.

of existing structures are derived from the MDE and OBE. Depending on the applicable conditions, a dam may be evaluated for one or both of these basic seismic loads.

The primary requirement for the earthquake-resistant design of dams is to protect public safety, life and property. Hence, most dams must be capable of resisting the most severe earthquake motion or fault movement conceivable at the dam site without uncontrolled release of the water impounded in the reservoir. In the case of the MDE, damage to the dam, even extensive, may be acceptable as long as no catastrophic flooding occurs.

In addition to the foregoing primary requirement, several factors govern the level of effort required for a seismic safety evaluation :

- (1) the seismic hazard rating of the dam site (see paragraph 5.2);
- (2) the type of dam;
- (3) the functional requirements;
- (4) the risk rating of the completed dam and reservoir (see paragraph 5.3);
- (5) the consequences of underestimating or overestimating the risk.

The decision of analyzing the dam for MDE, OBE and/or RIE conditions should be jointly made by the dam owner, its consultants and involved regulatory or review agencies, with strong consideration of the public sentiment.

4. CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL

Les paramètres sismiques utilisés pour l'évaluation de la sécurité du barrage représentent une ou plusieurs caractéristiques relatives au mouvement du sol, telles que : accélération, vitesse ou déplacement, spectres de réponse, ou évolutions de l'accélération dans le temps, qui caractériseront le SMD, le SBE et/ou le SIR. On peut les choisir de façon déterministe ou à partir d'une évaluation probabiliste du risque sismique. Diverses combinaisons de ces paramètres sont souvent adoptées. Par exemple, plusieurs évolutions de l'accélération dans le temps peuvent définir le même SMD, parce qu'il n'existe pas de procédé unique pour déterminer un niveau donné de mouvement sismique du sol. Comme autre exemple, le SBE peut être représenté par une accélération de pointe dans le sol et par une forme de spectre spécifiée.

Les paramètres sismiques représentant le SMD, le SBE ou le SIR servent souvent de données d'entrée pour les calculs numériques du barrage. Les résultats de tels calculs numériques sont utilisés pour évaluer le comportement et la sécurité du barrage, une fois qu'on a choisi le niveau du mouvement sismique.

Beaucoup des facteurs qui influent sur le mouvement du sol et les paramètres sismiques ne sont pas encore pleinement compris. Le mouvement du sol sur chaque site considéré est influencé par la « source », le « parcours de transmission » et les conditions « locales ».

Les effets de la « source » incluent le type de faille, les dimensions, le mécanisme et la direction de rupture, la profondeur du foyer, la chute de contrainte et la quantité d'énergie libérée.

Les effets du « parcours de transmission » concernent la propagation géométrique et l'absorption de l'énergie sismique, lorsque les ondes sismiques s'éloignent de la source. Ils comprennent des phénomènes tels que ceux liés au type de roche, aux structures géologiques régionales y compris les failles et plis, aux hétérogénéités de l'écorce terrestre, aux alluvions profondes et aux effets de direction (direction de la propagation des ondes par rapport à la direction de propagation de la rupture de la faille).

Les effets « locaux » résultent des conditions topographiques et géologiques existant sur le site et de l'interaction possible entre les ouvrages et le milieu environnant.

Les facteurs qui sont généralement considérés comme les plus significatifs pour la définition des paramètres sismiques sont :

- la classification du site (alluvions ou rocher);
- les propriétés physiques et l'épaisseur des matériaux de fondation;
- la proximité de la faille causale (les effets dans le champ proche);
- la magnitude du séisme de projet.

D'autres facteurs, tels que la direction de propagation de la rupture de la faille (effets de direction), le type de faille (normale, inverse, ou avec décrochement)

4. SELECTION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS

The seismic parameters used for dam safety evaluation represent one or several ground motion-related characteristics, such as acceleration, velocity, or displacement values, response spectra, or acceleration time histories, that will characterize the MDE, OBE or RIE. They may be selected deterministically, or based on a probabilistic seismic hazard evaluation. Various combinations of these parameters are often used. For example, several acceleration time histories may define the same MDE (as there is no unique way of specifying a given level of earthquake motion). As another example, an OBE can be represented by a peak ground acceleration and a specified spectral shape.

The seismic evaluation parameters representing the MDE, the OBE or the RIE often serve as input data for the numerical analyses of a dam. The results of such numerical analyses are used to evaluate the dam performance and safety, given the postulated level of motion.

Many of the factors that affect ground motion and the seismic evaluation parameters are not yet fully understood. Ground motion at any given site is influenced by "source", "transmission path" and "local" conditions.

"Source" effects include fault type, rupture dimensions, mechanism and direction, focal depth, stress drop and amount of energy released.

"Transmission path" effects relate to the geometric spreading and absorption of earthquake energy as the seismic waves travel away from the source. They include phenomena such as those due to rock type, regional geological structures including surface faults and folding, crustal inhomogeneities, deep alluvium, and directivity effects (direction of wave travel vs. direction of fault rupture propagation).

"Local" effects result from the topographic and geologic conditions present at the site and from the possible interaction between structures and the surrounding media.

The factors generally considered the most significant to the specification of seismic evaluation parameters are :

- site classification (alluvium or rock);
- physical properties and thickness of foundation materials;
- closeness to the causative fault (near-field effects);
- distance from the zone of energy release;
- magnitude of the design event.

Other factors, such as direction of fault rupture propagation (directivity effects),

et la topographie, sont probablement significatifs, mais jusqu'à présent n'ont pas été pris en compte, de façon courante, dans les études sismiques de barrages.

De préférence, les paramètres sismiques seront basés sur des considérations propres au site, faisant appel aux connaissances et observations actuelles se rapportant aux enregistrements sismiques effectués sur des sites de caractéristiques identiques.

Cependant, quand les données applicables au site sont trop peu nombreuses pour être significatives, une caractérisation du mouvement du sol, indépendante du site, doit être utilisée.

L'idéal serait de tenir compte de tous les facteurs affectant le mouvement du sol, mais, en général, il n'est pas pratique de les faire intervenir, en totalité, dans l'estimation des paramètres sismiques. Le plus souvent, un seul facteur de « source » — la magnitude — et un seul paramètre lié au « parcours de transmission » — la distance — sont pris en considération. Les effets « locaux » sont souvent négligés ou limités à une simple distinction entre les sites rocheux et les sites alluvionnaires, et à la prise en considération éventuelle des effets dans le champ proche du foyer.

Les éléments utilisés pour caractériser les paramètres sismiques de calcul sont décrits dans les paragraphes de l'Annexe 2.

type of faulting (normal, reverse, or strike-slip), and topography, are probably significant but have not to date been routinely included in the seismic studies of dams.

Preferably, the seismic evaluation parameters should be based on site-dependent considerations, making use of existing knowledge and actual observations that pertain to earthquake records obtained on sites with similar characteristics.

However, when applicable site data are too scarce to be meaningful, a site-independent characterization of ground motion must be used.

Ideally, all factors affecting ground motions should be considered, but generally it is not practical to include all of them in the estimation of seismic parameters. Most frequently, one "source" factor only — magnitude, and a single "transmission path" parameter — distance, are considered. "Local" effects are often disregarded or limited to the simple distinction between rock and alluvial sites and the possible consideration of near-field effects.

Formats used to characterize the seismic evaluation parameters are described in the paragraphs in Appendix 2.

5. FACTEURS INFLUANT SUR LE CHOIX DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL

5.1. GÉNÉRALITÉS

Les exigences posées par l'analyse et, par conséquent, la manière dont les paramètres sismiques sont choisis et définis dépendent, dans une large mesure, des objectifs de l'étude et des modes de rupture possibles du barrage. Les diverses méthodes d'analyse appellent différentes méthodes de détermination d'un niveau de mouvement sismique. Il est donc essentiel qu'une collaboration efficace s'établisse, dès le début du travail, entre les géologues, géophysiciens et ingénieurs responsables de la définition des charges sismiques et ceux qui vont calculer le barrage. Les facteurs qui influent sur la spécification des paramètres sismiques sont les suivants :

- (1) le niveau de risque sismique du site du barrage;
- (2) le niveau de risque lié au barrage terminé;
- (3) le type de barrage et le(s) mode(s) de rupture possible(s).

Du bon sens et une expérience professionnelle sont exigés pour déterminer la méthode la plus appropriée pour l'étude du barrage et pour la définition des paramètres sismiques, en s'appuyant sur les facteurs mentionnés ci-dessus.

L'objectif des présentes Recommandations n'est pas de discuter des méthodes d'analyse qui sont disponibles, ni de la manière de les mettre en œuvre. Cependant, les paragraphes suivants décrivent brièvement comment les facteurs susmentionnés influent sur le choix des paramètres sismiques appropriés, compte tenu de la méthode appliquée.

5.2. INFLUENCE DU NIVEAU DE RISQUE SISMIQUE DU SITE

Certains sites, en raison de leur localisation géographique, sont plus exposés que d'autres aux secousses sismiques. L'évaluation du niveau de risque sismique du site, examinée ci-après, peut être utilisée pour une différenciation rapide entre plusieurs sites. Le niveau de risque sismique d'un site de barrage influe sur les exigences et le niveau de perfection requis pour la définition des paramètres sismiques. Le risque sismique d'un site peut être classé en se basant sur l'accélération de pointe du sol (APS), accélération maximale à laquelle on peut s'attendre en cas de SMP, et sur des considérations, telles que la proximité de failles actives. Une classification identique pourrait être faite en utilisant des variables sismiques différentes de l'accélération de pointe du sol. Une classification préliminaire d'un site peut être faite aussi en utilisant des cartes de zones sismiques. Des études de zones, conduisant à l'établissement des cartes de zones sismiques, ont été effectuées dans certains pays, mais n'existent pas dans beaucoup de régions du monde, y compris certaines qui sont très sismiques. On doit se rappeler que la détermination

5. FACTORS INFLUENCING THE SELECTION OF THE SEISMIC EVALUATION PARAMETERS

5.1. GENERAL

The design objectives and the possible modes of failure of a dam control its analysis requirements to a large extent and, therefore, the way in which seismic evaluation parameters are selected and specified. Various methods of analysis call for different ways of specifying a given level of earthquake motion. It is, therefore, essential that effective communications be established at an early stage of the work between the geologists, geophysicists and engineers responsible for specifying the earthquake loads and those who will analyze the dam. Factors that affect the specification of seismic parameters are the following :

- (1) the seismic hazard rating of the dam site;
- (2) the risk rating of the completed structure;
- (3) the type of dam and its possible mode(s) of failure.

Judgment and professional experience are required to determine the most appropriate methodology for evaluation of the dam and for specifying the seismic parameters, based on the above factors.

It is not the purpose of these Guidelines to discuss the methodologies of analysis which are available and/or how they should be implemented. The following paragraphs, however, briefly describe how the above factors affect the selection of appropriate seismic evaluation parameters, based on the applied methodology.

5.2. INFLUENCE OF SEISMIC HAZARD RATING OF SPECIFIC SITES

Some sites, because of their geographical location, are more exposed than others to potential earthquake ground motions. The site hazard rating, discussed below, can be used to quickly differentiate between several sites. The seismic hazard rating of a dam site influences the evaluation requirements and the level of refinement necessary for the definition of seismic evaluation parameters. The seismic hazard of a site can be rated based on the peak ground acceleration (PGA) that would be expected from the MCE and considerations such as the nearby presence of active faults. Similar classifications could be made using seismic variables other than the PGA. A preliminary rating of the site may also be made using existing seismic zone maps. Zonation studies (it should be remembered that seismic hazard zoning is usually part of "Building Codes"; risks related to dams are greater and necessary investigations should be made) leading to the establishment of zone maps have been conducted in some countries, but are nonexistent in many regions of the world including some that are highly seismic.

des zones de risque sismique fait d'habitude partie des « Codes de construction » : les risques liés aux barrages sont plus grands et les recherches nécessaires sont à effectuer.

Le Tableau suivant, qui s'applique aux emplacements de barrages, le type de barrage n'intervenant pas, peut être utilisé pour le classement du niveau de risque sismique d'un site : niveau allant de « bas » à « extrême ». On doit souligner que ce Tableau est destiné à fournir un moyen rapide pour évaluer le risque sismique. D'autres facteurs tels que la vitesse, les caractéristiques de fréquence et la durée, doivent être considérés avant de prendre une décision finale sur le niveau de l'effort exigé pour une étude sismique ou pour le calcul d'un barrage.

| Conditions | Classe de risque (Niveau de risque) |
|--|--|
| APS < 0,10 g | I (Bas) |
| 0,10 g ≤ APS ≤ 0,25 g | II (Modéré) |
| APS > 0,25 g mais sans faille active à moins de 10 km du site | III (Élevé) |
| APS > 0,25 g faille active à moins de 10 km du site | IV (Extrême) |

Ce Tableau est valable pour les sites présentant des matériaux de fondation de bonne qualité. Si des matériaux douteux sont rencontrés ou soupçonnés dans les fondations, comme, par exemple, des silts et sables saturés de faible densité, ou d'autres dépôts peu compacts, ces matériaux peuvent faire l'objet de reconnaissances particulières en vue de l'évaluation du risque sismique, y compris le risque de liquéfaction. Il sera prudent, dans de tels cas, d'augmenter la classe de risque sismique d'une unité, en indiquant la nécessité d'appliquer des analyses plus approfondies.

La classe de risque sismique d'un site de barrage fournit une indication préliminaire concernant les exigences de l'évaluation sismique :

— Pour les sites de la classe I, il sera normalement suffisant de définir les paramètres sismiques par les valeurs des secousses maximales (de pointe) du sol. Les méthodes d'analyses les plus simples seront acceptables. La plupart des barrages dans cette classe de risque sismique ne subiront pas de dégâts sous l'effet du SMD, et la prise en compte du SBE ou du SIR ne sera pas nécessaire, si le barrage est vérifié pour le SMD.

— Pour les sites de la classe II, les paramètres sismiques peuvent être définis par les valeurs des secousses maximales (de pointe) du sol, par les spectres de réponse ou par les évolutions des accélérations dans le temps, dépendant du type de barrage, de son niveau de risque et de son (ses) mode(s) de rupture possible(s), comme examiné ci-après. La prise en compte du SBE ne sera pas nécessaire, car les barrages bien étudiés et appartenant à la classe de risque II seront capables de résister au SMD avec peu de dégâts, pour peu qu'il y en ait.

The following Table, which applies to the dam location regardless of the type of dam, can be used to rate the seismic hazard of a site from low to extreme. It should be emphasized that this Table is intended only to provide a quick way of rating the seismic hazard. Other factors must be considered before making the final decision regarding the level of effort required for the seismic design or evaluation of a dam, like velocity, frequency characteristics and duration.

| Conditions | Hazard Class (Hazard Rating) |
|--|---------------------------------|
| PGA < 0.10 g | I (Low) |
| 0.10 g ≤ PGA ≤ 0.25 g | II (Moderate) |
| PGA > 0.25 g but no active fault within 10 km of site | III (High) |
| PGA > 0.25 g active fault closer than 10 km from site | IV (Extreme) |

The above Table applies to sites where good foundation materials are present. Where questionable materials, such as low density saturated silts and sands or other potentially loose deposits, are present or suspected in the dam foundation, such deposits may be specifically investigated for seismic hazards including potential liquefaction. It would be prudent in such cases to upgrade the hazard class by one unit, indicating the need of more sophisticated analyses.

The Hazard Class of a dam site will provide a preliminary indication of the seismic evaluation requirements :

— For sites in Hazard Class I, it will normally be sufficient to define seismic evaluation parameters with peak ground motion values. The simplest methods of analysis should be acceptable. Most dams in this hazard class will not experience damage under the MDE condition, and consideration of either OBE or RIE will not be necessary if the dam is checked for the MDE.

— For sites in Hazard Class II, seismic evaluation parameters may be defined with peak ground motion values, response spectra, or acceleration time histories, depending on the type of dam, its risk rating and its possible mode(s) of failure, discussed subsequently. Consideration of the OBE should not be necessary as well designed dams in Hazard Class II should be capable of resisting the MDE with little damage, if any at all.

— Pour les sites de la classe III, les paramètres sismiques seront de préférence définis par les évolutions des accélérations dans le temps, bien que les spectres de réponse puissent suffire pour l'analyse de certains barrages en béton, ou d'ouvrages annexes. La prise en compte séparée des SMD, SBE et SIR est souvent exigée.

— Pour les barrages de la classe IV, les évolutions des accélérations dans le temps sont absolument nécessaires, pour définir et représenter les phénomènes liés spécifiquement aux failles (comme, par exemple, les effets dans le champ proche ou les effets de direction), et pour tenir compte des conditions de fondations critiques.

5.3. INFLUENCE DU NIVEAU DE RISQUE POTENTIEL

Le risque potentiel associé aux barrages comprend des éléments relatifs aux ouvrages et des éléments socio-économiques. Les premiers dépendent principalement du volume de la retenue et de la hauteur du barrage, car les conséquences potentielles à l'aval sont proportionnelles à ceux-ci.

Les risques socio-économiques peuvent être exprimés par le nombre de personnes qui devraient être évacuées en cas de danger et par les dégâts possibles à l'aval.

Il est possible d'estimer le niveau de risque potentiel en pondérant ces divers éléments, en donnant un poids plus élevé aux barrages comportant des retenues de grande capacité, qui, en cas de rupture, nécessitent des opérations d'évacuation importantes et entraînent de lourds dégâts. Ainsi, un niveau de risque potentiel peut être formulé et subdivisé en différentes classes, se rangeant de « bas » à « extrême ».

On doit se rappeler que la pondération susmentionnée des éléments de risque et principalement des éléments de risque socio-économiques sont des évaluations basées sur le jugement et reflètent l'impact de l'environnement socio-économique. Les divers pays trouveront donc nécessaire d'adapter les éléments de risque socio-économiques aux circonstances dominantes. Les considérations précédentes peuvent être utilisées à titre d'indication générale.

Les deux Tableaux suivants permettent d'estimer le risque associé aux barrages. Quatre facteurs de risque sont séparément pondérés : bas, modéré, élevé, ou extrême :

| Facteur de risque | Extrême | Élevé | Modéré | Bas |
|---|-----------------|------------------|----------------|--------------------|
| Contribution au risque (valeurs de pondération) | | | | |
| Capacité (hm ³) | > 120 (6) | 120-1 (4) | 1-0,1 (2) | < 0,1 (0) |
| Hauteur (m) | > 45 (6) | 45-30 (4) | 30-15 (2) | < 15 (0) |
| Évacuations nécessaires (Nombre de personnes)... | > 1 000 (12) | 1 000-100 (8) | 100-1 (4) | Néant (0) |
| Dégâts possibles à l'aval | Élevés (12) | Modérés (8) | Faibles (4) | Inexistants (0) |

— For sites in Hazard Class III, seismic evaluation parameters should preferably be specified by acceleration time histories, although response spectra may be sufficient for the evaluation of some concrete dams or appurtenances to dam structures. Separate consideration of MDE, OBE and RIE will often be required.

— For sites in Hazard Class IV, acceleration time histories are mandatory to specify and represent fault-specific phenomena such as near-field or directivity effects, and to account for potentially critical foundation conditions.

5.3. INFLUENCE OF POTENTIAL RISK

The potential risk associated with dams consists of structural components and socio-economic components. The structural components of potential risk depend mostly on storage capacity and on the height of the dam, as the potential downstream consequences are proportional to the mentioned values.

Socio-economic risks can be expressed by a number of persons who need to be evacuated in case of danger and by potential downstream damage.

It is possible to rate the potential risk by weighting the mentioned components, associating a larger weighting factor to dams with larger storages, posing larger evacuation requirements and entailing larger potential downstream damage. In this way a risk rating can be formulated and subdivided into different classes, ranging from low to extreme.

It should be kept in mind that the above mentioned weighting of risk components, and especially the socio-economic risk components, are assessments based on judgement and reflect the impact of the socio-economic environment. Different countries will therefore find it necessary to adapt the socio-economic risk contribution to suit the prevailing circumstances. The foregoing considerations can be used as general guidance in this respect.

The two following Tables are convenient to rate the risk associated with dams. Four risk factors are separately weighted as low, moderate, high or extreme :

| Risk Factor | Extreme | High | Moderate | Low |
|---|-----------------|------------------|--------------|--------------|
| Contribution to risk (weighting points) | | | | |
| Capacity (hm ³) | > 120 (6) | 120-1 (4) | 1-0.1 (2) | < 0.1 (0) |
| Height (m) | > 45 (6) | 45-30 (4) | 30-15 (2) | < 15 (0) |
| Evacuation Requirements (No. of persons) | > 1 000 (12) | 1 000-100 (8) | 100-1 (4) | None (0) |
| Potential Downstream Damage | High (12) | Moderate (8) | Low (4) | None (0) |

Le Tableau ci-dessus est recommandé à titre d'indication générale. Cependant, dans des cas plus sévères (par exemple, hauteur de barrage supérieure à 90 m, capacité de retenue supérieure à 1 200 hm³), des considérations particulières de sécurité pourront être indiquées.

D'autres facteurs, tels que la direction de propagation de la rupture de la faille (effets de direction), le type de faille (normale, inverse, ou avec décrochement), la nature du matériau et la topographie, sont probablement significatifs, mais n'ont pas été pris jusqu'à présent en compte, de façon courante, dans les études sismiques de barrages.

Les valeurs de pondération pour chacun des facteurs de risque (indiquées entre parenthèses dans le Tableau) sont à additionner pour exprimer le Facteur de Risque Total :

$$\begin{aligned} \text{Facteur de Risque Total} = & \text{ Facteur de Risque (capacité)} \\ & + \text{ Facteur de Risque (hauteur)} \\ & + \text{ Facteur de Risque (évacuations nécessaires)} \\ & + \text{ Facteur de Risque (dégâts possibles à l'aval).} \end{aligned}$$

Le classement de risque du barrage, basé sur le Facteur de Risque Total calculé, s'établit comme suit :

| Facteur de Risque Total | Classe de risque (Niveau de risque) |
|-------------------------|-------------------------------------|
| (0- 6) | I (Bas) |
| (7-18) | II (Modéré) |
| (19-30) | III (Élevé) |
| (31-36) | IV (Extrême) |

On doit noter que, dans le cas des barrages existants, d'autres facteurs (par exemple, la disponibilité ou non de données sur la construction et l'entretien du barrage, de résultats d'interprétation des mesures d'auscultation et de surveillance du barrage, le niveau des études antérieures d'évaluation de la sécurité, l'aménagement de la zone à l'aval, nouveau ou projeté) peuvent avoir une influence sur le risque associé à un ouvrage particulier. Ces autres facteurs, cependant, ne peuvent pas être quantifiés facilement et seront pris en considération cas par cas. Beaucoup de barrages existants ont été calculés avec des accélérations relativement basses, en utilisant la méthode pseudo-statique. La réévaluation de la sécurité de l'ouvrage en utilisant des calculs dynamiques peut être nécessaire si on trouve que pour les sites en question des accélérations de pointe du sol élevées (par exemple, supérieures à 0,25 g) s'y appliquent. Cela peut se présenter si un séisme de plus grande magnitude que celui adopté dans le projet se produit dans la région.

La classification du risque des barrages est nécessaire pour orienter le choix des paramètres sismiques de calcul; les barrages présentant un niveau de risque élevé exigeront normalement une évaluation approfondie.

Les barrages dont le niveau de risque est élevé exigeront une méthode de calcul détaillée et l'utilisation des évolutions des accélérations dans le temps, spécialement si de tels barrages sont également associés à des sites comportant un niveau élevé de risque. Des méthodes d'évaluation plus simples, utilisant les spectres de réponse ou les mouvements maximaux (de pointe) du sol, peuvent être acceptées pour les barrages d'un niveau de risque bas ou modéré.

The above Table is recommended for general guidance. However, in more severe cases (e.g. height of dam above 90 m and stored water greater than 1 200 hm³) special considerations for safety might be indicated.

Other factors such as direction of fault rupture propagation (directivity effects), type of faulting (normal, reverse or strike-slip), nature of faulting material and topography, are probably significant but have not to date been routinely included in the seismic studies of dams.

The weighting points of each of the four risk factors, shown in parentheses in the Table, are summed to provide the Total Risk Factor as :

$$\begin{aligned}\text{Total Risk Factor} = & \text{ Risk Factor (capacity)} \\ & + \text{ Risk Factor (height)} \\ & + \text{ Risk Factor (evacuation requirements)} \\ & + \text{ Risk Factor (potential downstream damage).}\end{aligned}$$

The Risk Class of the dam is based on the Computed Total Risk Factor as follows :

| Total Risk Factor | Risk Class (Risk Rating) |
|-------------------|-----------------------------|
| (0- 6) | I (Low) |
| (7-18) | II (Moderate) |
| (19-30) | III (High) |
| (31-36) | IV (Extreme) |

It should be noted that, in the case of existing dams, other factors such as the availability or lack of construction and maintenance records, processed instrumentation and surveillance records, the level of effort expended in previous safety evaluations, and new or planned downstream development, may affect the risk associated with a particular structure. Such other factors, however, cannot be easily quantified and should be considered case by case. Many existing dams have been analysed with relatively low accelerations, using pseudostatic analyses. Re-evaluation of the structural safety using dynamic analyses may be necessary if high PGA (say above 0.25 g) are found to apply to these locations. This may specifically be the case if a greater magnitude event occurs in the area than considered in the design.

The risk classification of the dam is needed to further guide the selection of seismic evaluation parameters, as dams with high risk ratings will normally require a sophisticated level of evaluation.

Typically, dams with high risk rating will require a detailed method of analysis and the use of acceleration time histories, especially if such dams are also associated with a high site hazard rating. Simpler methods of evaluation, using response spectra or peak ground motion parameters, may be acceptable for dams of low or moderate risk ratings.

Il faut comprendre que l'approche indiquée dans les paragraphes 5.2 et 5.3 (classement des barrages selon le niveau de risque sismique du site, les dimensions du barrage et les conséquences globales à l'aval) est un traitement possible, mais non exhaustif, du problème de risque, auquel doit s'associer le jugement de l'ingénieur. Ce domaine est en cours d'évolution et les travaux du Comité des Risques aux Tiers (Bulletin 29, CIGB, 1977) ainsi que le rapport sur les risques et les dispositifs d'alerte (en préparation) devront être pris en considération dans les études futures.

5.4. INFLUENCE DU TYPE DE BARRAGE

Le type de barrage et son (ses) mode(s) de rupture possible(s) doivent être considérés, en même temps que le risque sismique du site et la classe de risque de l'ouvrage, pour le choix final des paramètres sismiques. Sans aucun doute, le jugement professionnel est nécessaire pour déterminer de quelle façon ces paramètres vont influer respectivement sur la détermination des paramètres sismiques.

L'objet des présentes recommandations n'est pas de discuter des méthodes les plus appropriées de calcul des barrages, de la combinaison des séismes avec les autres charges et des critères applicables pour l'évaluation du comportement de l'ouvrage.

Cependant, l'influence du type de calcul, du type de barrage et du (des) mode(s) de rupture possible(s), sur le choix des paramètres sismiques est brièvement examinée ci-après, du fait qu'ils interviennent fortement sur la manière dont ces paramètres seront définis.

La manière la plus complète de déterminer une charge sismique est d'utiliser les trois composantes orthogonales du mouvement du sol; c'est-à-dire les deux composantes horizontales et la composante verticale. Selon le calcul exigé, l'utilisation des trois composantes peut ne pas être toujours nécessaire.

5.4.1. Barrages en béton

Les problèmes de sécurité concernant les barrages en béton exposés à des séismes comprennent l'évaluation de la stabilité d'ensemble de l'ouvrage, comme, par exemple, la vérification de sa capacité de résistance aux forces latérales induites et aux moments correspondants, et la protection contre une fissuration excessive du béton. Des calculs de divers types peuvent être effectués (CIGB 1986), allant du calcul simplifié dans le cas des barrages-poids [11] (*) aux méthodes plus élaborées, comme, par exemple, la méthode « trial load » pour les barrages-vôûtes ou la méthode des éléments finis applicable à tous les types de barrage en béton.

Les mouvements maximaux (de pointe) du sol et les spectres de réponse seront suffisants pour définir les paramètres sismiques de calcul si des méthodes simplifiées d'évaluation sont prévues.

Les calculs dynamiques par la méthode des éléments finis peuvent être effectués en utilisant, soit les spectres de réponse, soit les évolutions des accélérations dans le temps, et seront exigés en général pour la plupart des barrages appartenant aux classes de risque ou de danger élevées. Étant donné que les contraintes induites sont un facteur principal dans l'étude du comportement du barrage et que le compor-

(*) Les chiffres entre crochets renvoient à la liste des références, Chapitre 6.

It should be understood that the approach shown in paras 5.2 and 5.3 (classifying dams according to site hazards, dam size and global downstream consequences) is a possible but not exhaustive treatment of the risk problem, which should be used with engineering judgement. This field is developing and the work of the Committee on Risks to Third Parties (Bulletin 29, ICOLD, 1977) and also the report on risks and alarm systems (under preparation) should be considered in further studies.

5.4. INFLUENCE OF TYPE OF DAM

The type of dam and the possible mode(s) of failure must be considered along with the site hazard and the structure risk rating to finalize the selection of seismic evaluation parameters. Undoubtedly, professional judgement is required to determine how these factors should respectively affect the specification of seismic evaluation parameters.

It is not the purpose of the Guidelines to discuss the most appropriate methods of analyzing a dam, the combination of earthquake with other loads and the applicable performance evaluation criteria.

However, the influence of the type of analysis contemplated, the dam type and possible failure mode(s) upon the selection of seismic evaluation parameters are briefly reviewed below, as they strongly influence the way in which such parameters should be defined.

The most complete way to specify earthquake loading is by using three, mutually perpendicular components of ground motion; i.e. two horizontal and one vertical. Depending on the analysis required, the use of all three components may not always be necessary.

5.4.1. Concrete Dams

Safety concerns for concrete dams subjected to earthquakes involve evaluation of the overall stability of the structure, such as verifying its ability to resist induced lateral forces and moments and preventing excessive cracking (overstressing) of the concrete. Various types of analyses can be performed (ICOLD, 1986), ranging from a simplified analysis in the case of gravity dams [11] (*) to more elaborate procedures, such as a trial load analysis in the case of arch dams, or analysis by the finite element method, which applies to any type of concrete dam.

Peak ground motion parameters and response spectra will be sufficient to define the seismic evaluation parameters, if simplified evaluation procedures are contemplated.

Dynamic finite element response analyses may be performed using either response spectra or acceleration time histories, and will normally be required for most dams in high risk or hazard ratings. Since the induced stresses are a primary factor in assessing the performance of the dam, and since linear elastic behavior is normally assumed, appropriate response spectra or acceleration time histories can

(*) Numbers between brackets refer to references, Chapter 6.

tement élastique linéaire est généralement adopté, les spectres de réponse ou les évolutions des accélérations dans le temps peuvent être utilisés pour la définition du Séisme de Projet et pour l'évaluation des valeurs maximales des contraintes. Cependant, si un calcul non linéaire est prévu, ou si le nombre des cycles de contraintes ou la valeur de la charge est un facteur important dans l'évaluation du comportement du barrage, les évolutions des accélérations dans le temps devront être utilisées exclusivement. Comme les barrages en béton répondent à des fréquences relativement élevées, il est important de représenter les évolutions des accélérations dans le temps, par fractions de temps suffisamment courtes, en général entre 0,005 et 0,02 s. Le choix approprié de ce fractionnement doit être vérifié avant d'entreprendre un calcul.

Pour les barrages-poids rectilignes, deux composantes du mouvement (horizontale et verticale) et le calcul bidimensionnel sont généralement suffisants. Cependant, les barrages-poids, dans des gorges relativement étroites, feront l'objet de calculs tridimensionnels, utilisant deux composantes horizontales et une composante verticale, si un calcul détaillé est justifié. Pour les barrages-vôûtes et pour la plupart des barrages-poids arqués, deux composantes horizontales indépendantes et une composante verticale du mouvement doivent être fournies afin d'effectuer un calcul tridimensionnel.

5.4.2. Barrages en remblai

Les problèmes de sécurité concernant les barrages en remblai exposés aux séismes portent, soit sur la perte de stabilité causée par une perte de résistance du remblai ou des fondations (par exemple, due à l'augmentation des sous-pressions), soit sur des déformations excessives (affaissement, tassement, fissuration du remblai, et ruptures des talus avec mouvements plans ou de rotation). On peut utiliser des méthodes de calcul (CIGB 1986), soit simplifiées, pseudo-statistiques [32, 40], soit détaillées (méthode linéaire équivalente ou méthode non linéaire appliquant les méthodes dynamiques des éléments finis ou des différences finies). Les méthodes simplifiées seront toujours essayées avant l'application de méthodes plus détaillées et plus complexes, pour obtenir une première information sur les effets des paramètres sismiques choisis. Si les matériaux du remblai ne sont pas susceptibles de perdre de la rigidité et de la résistance et si les niveaux de danger et de risque sismique sont bas, l'application des méthodes simplifiées et la détermination des facteurs de charge sismique à partir des paramètres du mouvement maximal du sol (de pointe) peuvent être entièrement suffisantes.

Pour l'estimation du comportement des barrages en remblai dans les classes élevées de danger ou de risque, les méthodes détaillées (comme, par exemple, les calculs aux éléments finis ou aux différences finies) sont souvent appliquées et il est nécessaire d'adopter les évolutions des accélérations dans le temps comme paramètres sismiques. Les barrages en remblai ont leurs périodes fondamentales de vibration situées souvent entre 0,5 et 1,5 s et, dans la méthode de calcul aux éléments finis, on peut adopter des fractions de temps plus longues que celles recommandées pour les barrages en béton; des intervalles de temps jusqu'à 0,05 s ont été reconnus tout à fait acceptables dans certains cas. Cependant, si l'on utilise une formulation explicite des équations de mouvement, comme dans les calculs non linéaires aux différences finies, un intervalle de temps extrêmement court est exigé (en général, 0,001 s ou moins).

be used to specify the Design Earthquakes for peak stress evaluation purposes. However, if non-linear analysis is contemplated, or if the number of concrete stress cycles or the extent of significant stressing is important to the evaluation of the dam performance, acceleration time histories should be used exclusively. Because concrete dams generally respond at relatively high frequencies, it is important that the acceleration time histories be digitized at a sufficiently short time-step, typically ranging from 0.005 to 0.02 second. The proper selection of the digitization time-step should be verified before an analysis is undertaken.

For straight concrete gravity dams, two components of motion, one horizontal and one vertical, and two-dimensional analysis are generally sufficient. However, concrete gravity dams in relatively narrow canyons should be analyzed three-dimensionally using two components of horizontal motion and a vertical component, if detailed analyses are warranted. For concrete arch dams, and most curved concrete gravity dams, two stochastically independent horizontal and one vertical component of motion must be provided in order to perform a three-dimensional analysis.

5.4.2. Embankment Dams

Safety concerns for embankment dams subjected to earthquakes involve either the loss of stability due to a loss of strength of the embankment or foundation materials (e.g., due to pore pressure build-up), or excessive deformations (slumping, settlement, cracking of the embankment, and planar or rotational slope failures). Analyses can be performed (ICOLD, 1986) using simplified, pseudostatic [32, 40], or detailed equivalent linear or non-linear dynamic finite element and finite difference procedures. Simplified procedures should always be attempted before using more detailed and complex methods to obtain early information on the effects of the seismic parameters chosen. If the embankment materials are not susceptible to loss of stiffness and strength and the hazard and risk ratings are low, simplified procedures and the derivation of seismic load factors from specified peak ground motion parameters may be entirely sufficient.

For estimating the performance of embankment dams in high hazard or risk classes, detailed procedures (such as finite element or finite difference analyses) are often performed, and acceleration time histories are required as seismic evaluation parameters. Embankment dams have fundamental periods of vibration that often range between 0.5 and 1.5 second and, for use in finite element analyses, a digitization interval longer than that recommended for concrete dams may be sufficient; time-steps up to 0.05 second have been shown to be quite acceptable in some cases. However, if an explicit formulation of the equations of motion is used, such as for non-linear finite difference analyses, an extremely short digitization time-step is required (typically 0.001 second, or less).

Si les fondations et les matériaux du remblai ne sont pas susceptibles de perdre de la rigidité et de la résistance, ou si le remblai n'est pas saturé, le calcul dynamique du barrage servira de base pour l'estimation des déplacements permanents induits par le séisme et l'attention sera portée sur la réponse en accélération du barrage. Si les fondations ou les matériaux du remblai peuvent perdre de la rigidité et de la résistance, un calcul dynamique du barrage portera sur le nombre et l'amplitude des cycles de contraintes induites, afin de déterminer si les contraintes induites par le séisme sont suffisantes pour déclencher une perte de résistance. L'attention sera alors portée sur la réponse en contraintes du barrage. Pour le calcul détaillé d'un barrage en remblai, les paramètres sismiques de calcul ne peuvent pas être directement définis par un spectre de réponse, car l'évolution des pressions interstitielles augmentées ou des déformations excessives est largement contrôlée par la durée des secousses. Une forme spectrale spécifiée peut être, cependant, utilisée pour vérifier si les évolutions des accélérations choisies conviennent.

Finalement, bien que l'on considère souvent que la réponse dynamique des barrages en remblai n'exige pas la prise en considération de la composante verticale du mouvement du sol et des effets hydrodynamiques de l'eau de la retenue, de tels sujets sont ouverts à la discussion, particulièrement dans le cas des barrages en remblai avec des pentes raides, comme dans le cas des barrages en enrochements.

If the foundation and embankment materials are not susceptible to loss of stiffness and strength, or if the embankment is not saturated, the dynamic analysis of the dam will serve as a basis to estimate permanent earthquake-induced displacements, and emphasis will be given to the acceleration response of the dam. If the foundation or embankment materials can lose stiffness and strength, a dynamic analysis of the dam should be used for estimating the number and amplitude of induced stress cycles to determine whether the earthquake-induced stresses are sufficient to trigger a loss of strength. Emphasis will be given to the stress response of the dam. For the detailed analysis of an embankment dam, the seismic evaluation parameters cannot be directly specified as a response spectrum, as the development of either increased pore pressures or excessive deformations is largely controlled by the duration of shaking. A specified spectral shape, however, can be used as a guide for evaluating the appropriateness of the selected acceleration time histories.

Lastly, although it is often considered that the dynamic response of embankment dams does not require consideration of the vertical component of ground motion and of the hydrodynamic effects of the reservoir water, such considerations are open for discussion, particularly in the case of embankment dams with steep slopes, such as rockfill dams.

6. REFERENCES

1. AKI, K. (1983) : "Strong Motion Prediction Using Mathematical Modeling Techniques", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, December, pp. 529-541.
2. AMBRASEYS, N. N. (1973) : Fifth World Conference on Earthquake Engineering.
3. BAECHER, G. B., KEENEY, R. L. (1982) : Statistical Examination of Reservoir - Induced Seismicity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 553-569.
4. BOLT, B. A. (1973) : "Duration of Strong Ground Motion", 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, Proc., Vol. I, 6-D, Paper 292.
5. BOLT, B. A. (1981) : "Interpretation of Strong Ground Motion Records", State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Misc. Paper 5-73-1, Report 17, October, 215 pp.
6. BOLT, B. A., ABRAHAMSON, N. A. (1982) : "New Attenuation Relations for Peak and Expected Acceleration of Strong Ground Motion", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, December, pp. 2307-2321.
7. BOORE, D. M., JOYNER, W. B. (1982) : "The Empirical Prediction of Ground Motion", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, December, pp. 543-560.
8. CAMPBELL, K. W. (1981) : "Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, December, pp. 2039-2070.
9. CAMPBELL, K. W. (1983) : "Preliminary Analysis of the Near-Source Scaling Characteristics of 5 to 10 Hz. Pseudo-Relative-Velocity", Presented at the 1983 Annual Meeting of the Seism. Soc. Am., Salt Lake City, Utah, May 2-4.
10. CHANG, F. K., KRINITZSKY, E. L. (1977) : "State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States", Miscellaneous Paper 5-73-1, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Report 8, December, 58 pp.
11. CHOPRA, A. K. (1978) : "Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams", *Jour. of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 104, No. ST6, June, pp. 953-971.
12. CORNELL, C. A. (1968) : "Engineering Seismic Risk Analysis", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
13. CORNELL, C. A., VANMARCKE, E. H. (1969) : "The Hajer Influences on Seismic Risk", Proc. 4th World Conf. on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-1, pp. 69-83.
14. DER-KIUREGHIAN, A., ANG, A. H-S (1977) : "A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 67, No. 4, pp. 1173-1194.
15. DONOVAN, N. C. (1983) : "A Practitioner's View of Site Effects on Strong Ground Motion", Workshop on "Site-Specific Effects of Soil and Rock Ground Motion and Implications for Earthquake-Resistant Design", Reston, VA., July 25-27, Proc. Conf. XXII, pp. 68-79.
16. DONOVAN, N. C., BORNSTEIN, A. (1977) : "The Problems of Uncertainties in the

Use of Seismic Risk Procedures ", ASCE Fall Convention and Exhibit, San Francisco, Oct. 17-21, Preprint 2913, *The Use of Probabilities in Civil Engineering*, pp. 1-36.

17. GUHA, S. K. (1982) : Hazards Due to Reservoir-Induced Seismicity (RIS) in India, Seventh Symposium on Earthquake Engineering, Roorkee, India, November 10-12 : Sarita Prakashim, Meerut, India, Vol. I, pp. 37-42.
18. GUPTA, H. K. (1985) : The Present Status of Reservoir-Induced Seismicity Investigations, With Special Emphasis on the Koyna Earthquakes : Tectonophysics, Vol. 118, pp. 254-279.
19. HALL, W. J., MOHRAZ, B., NEWMARK, N. M. (1975) : " Statistical Studies of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra ", Technical Report, Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services, Urbana, Illinois and Proceedings of 3rd SMIRT Conference, London, England.
20. HANKS, T. C., MCGUIRE, R. K. (1981) : " The Character of High-Frequency Strong Ground Motion ", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, December, pp. 2071-2095.
21. HOUSNER, G. W. (1980) : " The Design Earthquake ", lecture notes for the " Advances in Earthquake Engineering " course, University of California Extension, Berkeley, June 16-20, 44 pp.
22. HUSID, R. (1973) : " Terremotos-Earthquakes ", Editorial Andres Bello, Santiago, Chile. ICOLD (1986). *ICOLD Bulletin* No. 52.
23. IDRISI, I. M. (1985) : " Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice ", Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, August 12-16.
24. JAPAN MINISTRY OF CONSTRUCTION, DEPT. OF PUBLIC WORKS (1977) : Aseismic Design Code.
25. JOHNSON, J. A. (1980) : " Spectral Characteristics of Near-Source Strong Ground Motion ", 7th World Conf. on Earth. Eng., September 8-13, Istanbul, Turkey, Proc., Vol. 2, pp. 131-134.
26. JOHNSON, J. A., TRAUBENIK, M. L. (1978) : " Magnitude-Dependent Near-Source Ground Motion Spectra ", ASCE Geotechnical Engineering Division, Specialty Conference, June 19-21, Pasadena, CA, pp. 530-539.
27. JOYNER, W. B., BOORE, D. M. (1982) : " Prediction of Earthquake Response Spectra ", 51st Annual Convention, SEAOC, Sep. 30-Oct. 2, 1982, Sacramento, CA, *Proceedings*, pp. 359-375.
28. KATAYAMA, T. (1982) : " An Engineering Prediction Model of Acceleration Response Spectra and Its Application to Seismic Hazard Mapping ", *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 10, No. 1, January-February, pp. 149-163.
29. KENNEDY, R. P. et al. (1983) : " Engineering Characterization of Earthquake Ground Motion for Nuclear Power Plant Design ", Presented at Seismic Risk and Heavy Industrial Facilities Conference, San Francisco, CA, May 11, 19 pp.
30. KIREMIDJIAN, A. S., SHAH, H. C. (1978) : " Probabilistic Site-Dependent Response Spectra ", Stanford University, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 29, April, 86 pp.

31. KULKARNI, R. B., SADIGH, K., IDRISI, I. M. (1979) : " Probabilistic Evaluation of Seismic Exposure ", *Proceedings, Second U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Stanford, CA, pp. 90-98.
32. MAKDISI, F. I., SEED, H. B. (1978) : " Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations ", *Journ. of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. GT7, July, pp. 849-867.
33. MCGUIRE, R. K. (1976) : " FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis ", U.S. Geological Survey, Open File Report 76-67.
34. MCGUIRE, R. K. (1977) : " Seismic Design Spectra and Mapping Procedures Using Hazard Analysis Based Directly on Oscillator Response ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, pp. 211-234.
35. MEADE, R. B. (1982) : " The Evidence for Reservoir-Induced Earthquake ", in *State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States*, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Misc. paper S-73-1.
36. MERZ, H. A., CORNELL, C. A. (1973) : " Seismic Risk Analysis Based on a Quadratic Magnitude Frequency Law ", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 63, No. 6, December, pp. 1999-2006.
37. MOHRAZ, B. (1976) : " A Study of Earthquake Response Spectra for Different Geological Conditions ", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 66, No. 3, June, pp. 915-935.
38. MOHRAZ, B. (1978) : " Influences of the Magnitude of the Earthquake and the Duration of Strong Motion on Earthquake Response Spectra ", Central American Conf. on Earthquake Eng., San Salvador, C.A., January 9-12, Proc., pp. 27-35.
39. MORI, K., ISHIMARA, K., TAEFYA, K., KANAZASHI, K. (1980) : Seismic Stability Analyses of Kekubo Dam. ICE Oct., 1980. Design of Dams to Resist Earthquakes.
40. NEWMARK, N. M. (1968) : " Problems in Wave Propagation in Soil and Rock ", International Symp. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, August 23-25, U. of New Mexico, Albuquerque, pp. 7-26.
41. NEWMARK, N. M., HALL, W. J. (1982) : " Earthquake Spectra and Design ", Earthquake Engineering Research Institute, Monograph Series, Vol. 3, 103 pp.
42. RIZZO, P. C., SHAW, D. E., SNYDER, M. D. (1976) : " Vertical Seismic Response Spectra ", *Journ. of Power Division, ASCE*, Vol. 102, No. P01, January.
43. SEED, H. B., IDRISI, I. M. (1982) : " Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes ", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, Monograph, Library of Congress Catalog Card Number 82-84224.
44. SEED, H. B., UGAS, C., LYSMER, J. (1974) : " Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design ", U. of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 74-12, November, 14 pp.
45. SIMPSON, D. W. (1986) : " Triggered Earthquakes ", *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 14, pp. 21-42.
46. TRIFUNAC, M. D., BRADY, A. G. (1975) : " On the Correlation of Seismic-Induced Intensity Scales With Peaks of Recorded Strong Ground Motion ", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 1, pp. 139-162.
47. WHEATON, R. D., POLIVKA, R. M. (1980) : " Uniform Probability Response Spectra for a Site Near the San Andreas Fault ", 7th World Conf. on Earth. Eng., September 8-13, Istanbul, Turkey, Proc., Vol. 2, pp. 279-286.

7. GLOSSAIRE

Les définitions suivantes sont données pour permettre une compréhension uniforme des termes utilisés dans le présent document. Pour les mots ou termes, figurant dans le Glossaire CIGB (Bulletin 32a) et désignés par (*), les définitions sont celles données dans ce Glossaire.

Amortissement : Résistance réduisant ou s'opposant à la vibration par absorption d'énergie. Il existe différents types d'amortissement, comme, par exemple, l'amortissement dû au matériau (visqueux, Coulomb) et l'amortissement géométrique (amortissement par rayonnement).

Amortissement critique : La plus petite valeur d'amortissement capable d'empêcher une vibration oscillatoire libre, dans un système à un seul degré de liberté.

APS : Accélération de Pointe (maximale) du Sol.

Atténuation : Diminution des amplitudes et changement des fréquences des ondes sismiques en fonction de la distance parcourue, résultant de la propagation géométrique, de l'absorption de l'énergie et de la dispersion. Ce terme désigne aussi : (1) une diminution de la magnitude du signal pendant la transmission, (2) une réduction de l'amplitude ou de l'énergie sans changement de la forme de l'onde.

Champ libre : Régions de la surface du sol qui ne sont pas influencées par les ouvrages construits. Désigne également un milieu qui ne contient pas d'ouvrages (profil de champ libre) ou une région dans laquelle les effets aux limites n'ont pas d'influence appréciable sur le comportement du milieu.

Chute de contrainte : Différence entre la valeur initiale de la contrainte de cisaillement, qui s'exerce sur le plan de la faille, et la valeur résiduelle de la contrainte de cisaillement existant sur la même faille après le glissement.

Épicentre (*) : Projection du foyer (hypocentre) d'un séisme sur la surface de la Terre.

Faille : Fracture ou zone de fracture dans l'écorce terrestre, le long de laquelle s'est produit un déplacement des deux côtés, l'un par rapport à l'autre et parallèlement à la fracture.

Faille active : Faille valablement identifiée et déterminée en position, qui est connue pour avoir produit des séismes historiques ou montre une évidence géologique de déplacements dans la période Holocène (11 000 ans), et qui, du fait de sa structure tectonique présente, peut engendrer des mouvements pendant la durée de vie prévue des ouvrages construits. Des différences d'opinions concernant la définition de l'activité sont notées. Du point de vue de l'application au génie parasismique, une faille génératrice de séismes diffère des autres types de fractures, comme celles résultant des glissements, de la poussée de la glace, des effets de rabattement de la nappe phréatique, etc.

Faille avec décrochement : Faille dont le mouvement dans le plan de la faille est principalement horizontal.

Fond rocheux : Tout matériau sédimentaire, cristallin ou métamorphique, représentant une unité géologique; constitué d'une masse, couche ou barre saine et solide de minéraux; présente des vitesses de propagation des ondes transversales (de cisaillement) supérieures à 750 m/s. Le fond rocheux peut affleurer à la surface ou se trouver au-dessous d'une couverture de sol.

Foyer : Voir hypocentre.

Fréquence : Nombre de Hz.

Hypocentre (ou Foyer) (*) : Endroit plus ou moins profond où se produit le choc initial qui engendre les ondes sismiques.

Intensité : Index numérique décrivant les effets d'un séisme sur les ouvrages construits ou sur les autres particularités de la surface terrestre. L'attribution des valeurs d'intensité est subjective et est influencée par la qualité de la construction, les conditions sur la surface du sol et la perception individuelle de l'observateur. Différentes échelles d'intensité sont utilisées en divers pays, comme, par exemple, l'Échelle d'Intensité Modifiée de Mercalli (couramment utilisée aux États-Unis).

Magnitude (*) : Mesure objective d'un tremblement de terre, indépendante du lieu d'observation. Elle est calculée à partir d'enregistrements sur sismographes et s'exprime en degrés, numérotés en chiffres ordinaires avec décimales et établis sur la base d'une échelle logarithmique.

Mouvement dans le champ proche : Mouvement du sol enregistré au voisinage d'une faille. A titre d'exemple, à l'ouest des Montagnes Rocheuses aux États-Unis, le champ proche peut être défini à partir du Tableau suivant :

| Magnitude de Richter M | Intensité maximale de Mercalli Modifiée I_0 | Rayon du Champ Proche (km) |
|------------------------|---|----------------------------|
| 5,0 | VI | 5 |
| 5,5 | VII | 15 |
| 6,0 | VIII | 25 |
| 6,5 | IX | 35 |
| 7,0 | X | 40 |
| 7,5 | XI | 45 |

Ces limites du mouvement dans le champ proche sont mesurées à partir de l'emplacement de l'épicentre en l'absence de rupture visible de la faille, ou perpendiculairement à la trace de la faille causale. Dans certaines régions, les limites des mouvements dans le champ proche ne sont pas établies (comme, par exemple, dans la partie est des États-Unis). Les limites peuvent nécessiter des ajustements dans les cas des failles inverses ou des failles de chevauchement.

Phase : Angle de retard ou d'avance d'une onde sinusoïdale par rapport à une référence. La réponse en phase est le graphique du déphasage en fonction de la fréquence.

Profondeur du foyer : Distance verticale entre l'épicentre et l'hypocentre.

Rapport d'amortissement : Rapport entre l'amortissement réel et l'amortissement critique.

Région tectonique : Zone géologique caractérisée par une structure géologique et des caractéristiques sismiques identiques.

Secousse forte : Mouvement du sol d'amplitude suffisante pour être considéré comme techniquement important pour l'évaluation des dégâts dus aux séismes.

SBE : Séisme de Base d'Exploitation.

SIR : Séisme Induit par la Retenue.

SMD : Séisme Maximal de Dimensionnement.

SMP : Séisme Maximal Possible.

Spectre de réponse : Représentation graphique des valeurs maximales des réponses en accélération, vitesse et/ou déplacement d'une série infinie de systèmes à un degré de liberté, soumis à une excitation dynamique fonction du temps, comme, par exemple, un mouvement du sol. Les valeurs maximales de réponse sont exprimées en fonction de la période naturelle non amortie pour chaque amortissement donné.

Les valeurs approximatives des spectres de réponse en accélération, vitesse et déplacement, peuvent être calculées par transformations mutuelles, en admettant une relation sinusoïdale entre elles. Quand on les calcule de cette manière, on se réfère parfois aux valeurs des spectres de réponse en pseudo-accélération, en pseudo-vitesse relative ou en pseudo-déplacement relatif.

7. GLOSSARY

The following definitions are given to help achieving a uniform understanding of the terms used in these guidelines. For those words or phrases appearing in the ICOLD Glossary (Bulletin 32a) and marked by (*), the definitions are those given in this Glossary.

Active fault : A fault, reasonably identified and located, known to have produced historical earthquakes or showing geologic evidence of Holocene (11 000 years) displacements and which, because of its present tectonic setting, can undergo movement during the anticipated life of man-made structures. Differences of opinion regarding the definition of activity are acknowledged. For the purpose of earthquake engineering application, a seismogenic or earthquake fault is distinct from other types of fractures such as those resulting from landslides, ice thrusting, groundwater withdrawal effects, etc.

Attenuation : Decrease in amplitude and change in frequency content of the seismic waves with distance because of geometric spreading, energy absorption and scattering. Also designates (1) a decrease of signal magnitude during transmission, and (2) a reduction of amplitude or energy without change of wave form.

Bedrock : Any sedimentary, igneous, or metamorphic material represented as a unit in geology; being a sound and solid mass, layer, or ledge of mineral matter; and with shear wave threshold velocities greater than 750 m/s. Bedrock can be exposed at the ground surface or underlie soil layers.

Critical damping : The least amount of damping which will prevent free oscillatory vibration, in a one degree-of-freedom system.

Damping : Resistance which reduces or opposes vibrations by energy absorption. There are different types of damping, such as material (viscous, Coulomb), and geometric (radiation) damping.

Damping ratio : The ratio of the actual damping to the critical damping.

Epicenter (*) : The point on the Earth's surface directly above the focus (hypocenter) of an earthquake.

Fault : A fracture or fracture zone in the earth's crust along which there has been displacement of the two sides relative to one another, parallel to the fracture.

Focal depth : The vertical distance between the epicenter and the hypocenter.

Focus : See Hypocenter.

Free-field : The regions of the ground surface which are not influenced by man-made structures. Also designates a medium which contains no structure (free-field profile), or a region where boundary effects do not influence the behavior of the medium significantly.

Frequency : Number of Hz.

Hypocenter (or Focus) (*) : The point within the Earth which is the centre of an earthquake and the origin of its elastic waves.

Intensity : A numerical index describing the effects of an earthquake on man-made structures, or other features of the earth's surface. The assignment of intensity values is subjective and is influenced by the quality of construction, the ground surface condition and the individual perception of the observer. Different intensity scales are used in various countries, such as for instance the Modified Mercalli Intensity scale which is the most widely used in the United States.

Magnitude (*) : A rating of a given earthquake independant of the place of observation. It is calculated from measurements on seismographs and it is properly expressed in ordinary numbers and decimals based on a logarithmic scale.

MCE : The Maximum Credible Earthquake.

MDE : The Maximum Design Earthquake.

Near-field motion : Ground motion recorded in the vicinity of a fault. For instance, in the United States west of the Rocky Mountains, near-field may be defined based on the following Table :

| Richter Magnitude M | Modified Mercalli Maximum Intensity I_u | Radius of Near-Field (km) |
|------------------------|--|------------------------------|
| 5.0 | VI | 5 |
| 5.5 | VII | 15 |
| 6.0 | VIII | 25 |
| 6.5 | IX | 35 |
| 7.0 | X | 40 |
| 7.5 | XI | 45 |

These limits of near-field motions are measured from the epicenter location in the absence of visible fault rupture, or perpendicularly to the trace of the causative fault. In some regions there are no established limits of near-field motions as for exemple in the Eastern United States. The limits may need to be adjusted in the case of thrust and reverse faults.

OBE : The Operating Basis Earthquake.

PGA : Peak Ground Acceleration.

Phase : The angle of lag or lead of a sine wave with respect to a reference. The phase response is the graph of phase shift versus frequency.

Response spectrum : A plot of the maximum values of acceleration, velocity, and/or displacement response of an infinite series of single-degree-of-freedom systems subject to a time dependent dynamic excitation, such as but not limited to ground motion. The maximum response values are expressed as a function of undamped natural period for a given damping.

Approximate response spectrum acceleration, velocity, and displacement values may be calculated from each other assuming a sinusoidal relationship between them. When calculated in this manner, these are sometimes referred to as pseudo-acceleration, pseudo-relative velocity, or pseudo-relative displacement response spectrum values.

RIE : Reservoir-Induced Earthquake.

Stress drop : Initial shear stress acting across a fault plane minus the residual shear stress across the same fault plane after occurrence of slippage.

Strike-slip fault : A fault in which movement is principally horizontal.

Strong motion : Ground motion of sufficient amplitude to be of engineering significance in the evaluation of damage due to earthquakes.

Tectonic province : A geologic area characterized by similarity of geologic structure and earthquake characteristics.

APPENDICES 1 and 2

ANNEXES 1 et 2

LISTE DES PRINCIPAUX FACTEURS A CONSIDÉRER DANS L'ÉTUDE SISMIQUE

1. FACTEURS RÉGIONAUX

1.1. Structure géologique régionale

- histoire géologique de la zone du projet;
- identification des caractéristiques physiographiques régionales;
- description des formations géologiques (types de roche...);
- emplacement des accidents géologiques régionaux (plis, fractures, failles...);
- estimation de l'activité de chaque faille (degré de déplacement...) et de l'activité orogénique (degré d'affaissement) de la zone étudiée.

1.2. Histoire sismique

- documentation;
- coordonnées de l'épicentre;
- intensité à l'épicentre;
- effets en surface : lignes d'égale intensité sismique (carte);
- profondeur du foyer;
- zone où l'événement a été ressenti;
- intensité induite au site du barrage (connue ou estimée);
- quantification du niveau de l'activité sismique (si possible ou évident).

1.3. Séismologie (si nécessaire : dépend du type de barrage et du niveau des séismes historiques)

- activité microsismique;
- profondeurs des foyers;
- mécanismes aux foyers;
- enregistrements des fortes secousses (s'il en existe).

1.4. Interprétation séismotectonique

- estimation des contraintes régionales aux différentes périodes géologiques (à partir de stylolites);
- mesures de contraintes *in situ* effectuées dans la région du site (si elles existent);
- interprétation des mécanismes tectoniques régionaux et des types de failles associées;
- situation et description des failles (et des zones de cisaillement) capables de

LIST OF PRIMARY FACTORS TO CONSIDER IN SEISMIC DESIGN

1. REGIONAL FACTORS

1.1. Regional geologic setting

- geologic history of the project area;
- identification of the regional physiographic features;
- description of geological formations (rock types...);
- location of major regional geological structural features (folds, fractures, faults...);
- estimation of the relative degrees of fault activity (rate of displacement...) and deformation activity (rate of subsidence...) of the study area.

1.2. Seismic history

- catalogs;
- epicenter coordinates;
- epicentral intensity;
- surface effects : isoseismal contours (map);
- focal depth;
- felt area;
- intensity induced at the dam site (known or estimated);
- quantification of the rate of seismic activity (if possible or obvious).

1.3. Seismology (if necessary : depends on the type of dam and the level of historical earthquakes)

- microseismic activity;
- focal depths;
- focal mechanisms;
- strong-motion records (if they exist).

1.4. Seismotectonic interpretation

- estimation of the regional stresses at different geological periods (from stylolites, ...);
- *in situ* stress measurements within the region of the site (if they exist);
- interpretation of the regional tectonic mechanisms and associated types of faulting;
- location and description of faults (and shear zones) able to generate earthquakes (or to be displaced by earthquakes);

produire des séismes (ou de subir des déplacements du fait des séismes);

- définition des régions séismotectoniques, carte séismotectonique.

2. FACTEURS LOCAUX

2.1. Géologie locale

- stratigraphie et pétrographie du rocher de fondation;
- tectonique et microtectonique locales (failles, diaclases...);
- dépôts superficiels (alluvions, terrasses fluviales, moraines, sols...);
 - carte hypsométrique des dépôts superficiels (à utiliser pour les effets sur le site);
 - lignes de niveau du rocher de fondation.

2.2. Hydrogéologie

Changements périodiques du niveau statique de l'eau, études de perméabilité, composition chimique de l'eau.

2.3. Études géophysiques

Mesures au gaz de Radon, étude des courants de convection, études géothermiques et mesures du champ de gravité.

2.4. Données géotechniques

- rocher de fondation;
- dépôts superficiels.

2.5. Exploitation des ressources naturelles au voisinage de l'emplacement du projet

- eaux souterraines;
- pétrole et gaz;
- dépôts minéraux.

- definition of seismotectonic provinces, seismotectonic map.

2. LOCAL FACTORS

2.1. Local geology

- stratigraphy and petrography of the bedrock;
- local tectonics and microtectonics (faults, joints...);
- superficial deposits (alluvium, river terraces, moraines, soils...);
 - hypsometric map of superficial deposits (to be used for site effects);
 - bedrock contour map.

2.2. Hydrogeology

Periodic changes in static water level, permeability studies, chemical composition of water.

2.3. Geophysical studies

Radon gas monitoring studies, convection currents, geothermal studies and gravity measurements.

2.4. Geotechnical data

- bedrock;
- superficial deposits.

2.5. Exploitation of natural resources in the vicinity of the project area

- ground water;
- oil and gas;
- mineral deposits.

DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES SISMIQUES DE CALCUL

1. PARAMÈTRES DU MOUVEMENT DE POINTE DU SOL

Le mouvement du sol peut être caractérisé par les valeurs de pointe (maximales) ou les valeurs effectives de l'accélération, de la vitesse et/ou du déplacement prévus. Les relations empiriques déduites des données sismiques disponibles, appelées équations d'atténuation, relient les paramètres du mouvement de pointe du sol à la distance depuis la source de l'émission d'énergie et à la magnitude. Ces équations sont, cependant, très sensibles à l'estimation de la distance et de la magnitude, spécialement dans le champ proche. La dispersion entre les valeurs observées et prédites est habituellement assez importante car beaucoup de facteurs (caractéristiques du site, emplacement des instruments enregistreurs, etc.) affectent les mesures des fortes secousses sismiques.

L'accélération de pointe du sol (APS), malgré ses défauts reconnus, comme, par exemple, l'impossibilité de sa prévision dans le champ proche ou sa manifestation assez courante aux hautes fréquences présentant peu d'importance technique, reste l'élément le plus utilisé pour caractériser les paramètres sismiques pour les calculs de barrages. Plusieurs équations d'atténuation ont été mises au point au cours des dernières années pour évaluer cette variable. L'intention n'est pas ici de recommander une quelconque équation d'atténuation spécifique, relative à l'accélération de pointe du sol (APS). Toutefois, on devra prendre en considération une moyenne pondérée des valeurs fournies pour cette variable par plusieurs équations les plus acceptées et les plus dignes de confiance. Par exemple, aux États-Unis, les références suivantes sont utilisées le plus souvent :

- Ambraseys, 1973, 1978 [2].
- Trifunac et Brady, 1975 [46].
- Campbell, 1981 [8].
- Boore et Joyner, 1982 [7].
- Bolt et Abrahamson, 1982 [6].
- Seed et Idriss, 1982 [43].
- Idriss, 1985 [23].

Il est souhaitable en général de définir d'abord l'APS pour les affleurements du rocher (étant donné que toutes les références mentionnées ci-dessus se rapportent aux équations d'atténuation applicables au rocher de fondation ou au sol dur). La valeur est alors ajustée, selon les nécessités, pour tenir compte des conditions spécifiques du site, telles que, par exemple, la topographie ou les « alluvions profondes », où les accélérations dans le champ libre contiennent en général plus d'énergie dans le domaine des périodes longues que celles concernant les sites rocheux.

Le terme d'erreur associé aux équations d'atténuation et la signification statistique des valeurs prédites (erreurs maximale absolue, effective, moyenne, médiane,

DETERMINATION OF SEISMIC EVALUATION PARAMETERS

1. PEAK GROUND MOTION PARAMETERS

Ground motion can be characterized by peak or effective values of expected acceleration, velocity, and/or displacement. Empirical relationships derived from available earthquake data, termed attenuation equations, relate peak ground motion parameters to distance from the source of energy release and to magnitude. Such equations are, however, very sensitive to the estimates of distance and magnitude, especially in the near-field. The scatter between observed and predicted values is usually fairly significant, as many factors, including but not limited to local site characteristics and the conditions of placement of the recording instruments, affect actual strong motion measurements.

Peak ground acceleration (PGA), despite recognized shortcomings, such as its lack of predictability in the near-field, or its common occurrence at high frequencies of little engineering significance, remains the most used element to characterize seismic evaluation parameters for dam analysis. Many attenuation equations have been developed in recent years to provide estimates of this variable. While it is not the intent of these Guidelines to recommend the use of any specific attenuation equation pertaining to PGA, consideration should be given to using a weighted average of values provided by several of the most accepted and reliable equations for this variable. For instance, in the United States, the following references are used most frequently :

- Ambraseys, 1973, 1978 [2].
- Trifunac and Brady, 1975 [46].
- Campbell, 1981 [8].
- Boore and Joyner, 1982 [7].
- Bolt and Abrahamson, 1982 [6].
- Seed and Idriss, 1982 [43].
- Idriss, 1985 [23].

It is generally desirable first to define the PGA as that occurring on « outcropping » bedrock (as all of the foregoing references provide attenuation equations applicable to bedrock, or firm soil sites). The value is then adjusted, as required, to account for specific site conditions, such as topography, or « deep alluvium », where free-field accelerations generally contain more energy in the long period range than those on a rock site.

The error term associated with attenuation equations, and the statistical significance of the predicted values (absolute maximum, effective, mean, median, or mean

ou moyenne plus un écart-type) doit être soigneusement examiné et compris avant d'utiliser de telles valeurs dans les calculs. La pratique courante dans les projets de barrages tend à s'appuyer sur les valeurs moyennes plutôt que sur les valeurs extrêmes des accélérations de pointe du sol (APS), car le conservatisme nécessaire est appliqué ailleurs, par exemple dans les ordonnées spectrales (voir chapitre 4.4).

Jusqu'à présent, peu de relations d'atténuation ont été mises au point pour les vitesses de pointe (qui, à vrai dire, peuvent être un meilleur indicateur de l'intensité des secousses du sol que les valeurs APS, en particulier dans le champ proche), pour les déplacements de pointe, ou pour la composante verticale du mouvement du sol. Le mouvement vertical peut être tout à fait significatif dans le champ proche et une évaluation détaillée d'un tel mouvement est recommandée pour tous les sites dans le champ proche. Pour les emplacements en dehors du champ proche, la valeur APS verticale peut être estimée, de façon prudente, entre les deux tiers et la moitié de la valeur APS horizontale.

2. DURÉE

La durée des secousses est un des paramètres sismiques les plus importants pour les barrages, car on a démontré qu'elle était liée directement aux dégâts, spécialement dans le cas des barrages en remblai.

Les durées des tremblements de terre peuvent être déterminées de différentes manières. Revêtent une importance pour les ingénieurs : le cadre de durée, mesuré entre la première et la dernière manifestation des accélérations supérieures à 0,05 g, à des fréquences supérieures à 2 Hz [4], et la durée Husid [22] relative à la quantité totale d'énergie contenue dans un enregistrement spécifique. Chang et Krinitzsky [10] ont examiné plusieurs relations empiriques entre la magnitude et la durée, et ont établi des courbes reliant le cadre de durée, la magnitude et la distance de l'épicentre, en distinguant le sol et la roche. Housner [21] a fourni des estimations corrigées de la durée des fortes secousses dans le champ proche. Les conditions locales peuvent aussi affecter la durée prévue des secousses sismiques et doivent être considérées cas par cas.

3. SPECTRES DE RÉPONSE

Les spectres de réponse représentent, en fonction de la fréquence, pour un rapport d'amortissement donné, la réponse maximale (en accélération, vitesse ou déplacement) d'un système à un seul degré de liberté, soumis à une excitation dépendant du temps. Les spectres de réponse caractérisant le SMD, le SBE ou le SIR peuvent être déterminés à partir de l'accélération, de la vitesse ou du déplacement de pointe du sol [19, 41], ou en utilisant les formes spectrales généralisées, dépendant ou non des caractéristiques du site.

Seed, Ugas et Lysmer [44] ont établi les formes spectrales générales (moyenne et moyenne plus un écart-type) applicable aux sites rocheux et autres sites. Ces résultats sont particulièrement utiles quand la magnitude du séisme de projet est proche de 6,5, du fait de la base de données qui a servi à définir de tels spectres. Des études identiques ont été effectuées ultérieurement par Mohraz [37] et Kiremidjian et Shah [30]. En 1978, Mohraz [38] a étendu son travail à l'évaluation de

plus one standard deviation) should be carefully reviewed and understood prior to using such values for analytical purposes. Current design practice for dams tends to rely on mean, rather than extreme values of the PGA, because the necessary conservatism is applied elsewhere, for example in the spectral ordinates (See Section 4.4).

So far, few attenuation relationships have been developed for peak velocity, which actually may be a better indicator of ground shaking intensity than the PGA especially in the near-field, for peak displacement, or for the vertical component of ground motion. Vertical motion can be quite significant in the near-field and detailed evaluation of such motion is recommended for all near-field sites. For locations outside the near-field, the vertical PGA may be conservatively taken between two-thirds and one-half of the horizontal PGA.

2. DURATION

The duration of shaking is one of the most important seismic evaluation parameters for dams, as it has been shown to be directly related to damage, especially in the case of embankments.

The durations of earthquakes can be estimated in different ways. Of significance to engineers are the bracketed duration, measured between the first and the last occurrence of acceleration pulses greater than 0.05 g, at frequencies above 2 Hz [4], and the Husid duration [22], which is related to the total amount of energy contained in a specific record. Chang and Krinitzsky [10] reviewed several empirical relationships between magnitude and duration and developed curves, relating bracketed duration, magnitude, and epicentral distance, that differentiate between soil and rock conditions. Housner [21] provided revised estimates of the near-field duration of strong motion. Local conditions may also affect the expected duration of earthquake shaking and should be considered on a case by case basis.

3. RESPONSE SPECTRA

Response spectra represent the maximum response (in acceleration, velocity, or displacement) as a function of frequency, for a given damping ratio, of a single-degree-of-freedom system subjected to a time-dependent excitation. Response spectra characterizing the MDE, OBE and RIE may be determined from peak ground acceleration, velocity and displacement consideration [19, 41], or by using site-dependent or site-independent generalized spectral shapes.

Seed, Ugas and Lysmer [44] developed mean and mean-plus-one standard deviation general spectral shapes applicable to rock and other sites. These results are particularly useful when the magnitude of the design event is close to 6.5, because of the data base from which such spectra were developed. Similar studies were subsequently performed by Mohraz [37] and Kiremidjian and Shah [30]. Mohraz [38] extended his work to evaluate the influence of magnitude and duration of spectral

l'influence de la magnitude et de la durée des formes spectrales. Les caractéristiques spectrales des mouvements dans le champ proche de la source, pour les magnitudes moyennes ou grandes, ont été établies empiriquement pour les sites rocheux [26] et pour d'autres sites [25]. Joyner et Boore [27], Donovan [15] et Idriss [23] ont présenté des méthodes pour établir les formes spectrales dépendant de la magnitude et de la distance. Les formes spectrales verticales ont été publiées par Mohraz [37] et Rizzo et al. [42].

Il est reconnu maintenant que l'utilisation des formes spectrales généralisées reste acceptable quand on s'attend à des événements de grande magnitude, mais que cette méthode est extrêmement prudente quand la magnitude ne dépasse pas 6,0 [29]. On a observé récemment que les ingénieurs de barrages avaient tendance à accorder une crédibilité accrue aux spectres de réponse dépendant des conditions de site. Il est recommandé, quand on utilise les formes spectrales généralisées, de vérifier, quand c'est possible, si elles s'accordent avec les spectres de réponse des séismes historiques obtenus pour des sites et des séismes de caractéristiques identiques.

Les formes spectrales sont généralement fournies dans un format normalisé (c. à d. ramenées à l'échelle de 1 g). Pour définir les mouvements sismiques, elles sont ramenées, uniformément et, dans la plupart des cas, indépendamment de la période considérée, à l'échelle d'une valeur spécifiée de l'accélération de pointe du sol, de la vitesse de pointe du sol, ou d'un autre paramètre sismique applicable (par exemple, l'intensité spectrale). Souvent, pour se placer du côté de la prudence dans les calculs de barrages, on utilise une forme spectrale moyenne augmentée d'un écart-type, la forme spectrale étant ramenée à l'échelle d'une valeur moyenne spécifiée d'un paramètre sismique, tel que l'APS.

Si des séismes peu profonds sont envisagés, les spectres doivent être déplacés vers des fréquences plus élevées, suivant les observations faites sur certains séismes européens [23].

Une variante aux formes spectrales est constituée par les équations d'atténuation applicables aux amplitudes spectrales [34, 20, 28, 9]. De cette façon, les paramètres de réponse spectrale sont directement définis en fonction de la magnitude, de la distance, de la fréquence et parfois des conditions de sol.

Le niveau de l'amortissement et le nombre des valeurs d'amortissement, pour lesquelles les spectres de réponse seront définis en vue de représenter le SMD, le SBE, ou le SIR, doivent contenir une série de valeurs applicables au type de barrage et au niveau de mouvement du sol considéré. Par exemple, les valeurs de l'amortissement pour les calculs de barrages en béton se situent généralement entre 3 % et 10 %, suivant que la réponse est supposée élastique de façon prédominante ou que la réponse non linéaire, correspondant par exemple à la fissuration du béton, est incluse indirectement dans le calcul en supposant un degré plus élevé d'amortissement. Les valeurs de l'amortissement pour les calculs de barrages en remblai se situent entre 5 % et 20 % et pour les fortes secousses sont supérieures à 15 %.

Pour caractériser des mouvements du sol et comparer des séismes différents, l'amortissement de 5 % est la valeur le plus souvent adoptée, car les formes spectrales généralisées pour cette valeur d'amortissement sont les plus disponibles.

4. ÉVOLUTION DES ACCÉLÉRATIONS DANS LE TEMPS

La définition des paramètres sismiques par leurs valeurs de pointe et leurs caractéristiques spectrales est suffisante pour beaucoup d'applications aux barrages.

shapes. Spectral characteristics of near-source motion at moderate to large magnitudes have been empirically established for rock sites [26] and other site conditions [25]. Joyner and Boore [27], Donovan [15] and Idriss [23] presented procedures to develop magnitude — and distance — dependent spectral shapes, and vertical spectral shapes have been published by Mohraz [37] and Rizzo et al. [42].

It is now recognized that the use of generalized spectral shapes remains acceptable when large magnitude events are expected, but is extremely conservative when the controlling magnitude does not exceed 6.0 [29]. Recent emphasis in the dam engineering profession has been to give added credibility to site-dependent response spectra. It is recommended that, when generalized spectral shapes are used, they be checked whenever possible for consistency with historical earthquake response spectra obtained for sites and earthquakes having similar characteristics.

Spectral shapes are generally provided in normalized format (i.e., scaled to 1 g). In order to define earthquake motion they are scaled uniformly and, in most cases, independently from the period considered, to a specified value of peak ground acceleration, peak ground velocity, or another applicable earthquake parameter (e.g., spectral intensity). Often, for more conservative dam analysis purposes, a mean-plus-one standard deviation spectral shape is used if scaled to a specified mean value of an earthquake parameter such as the PGA.

If shallow earthquakes are expected, the spectra should be shifted towards higher frequencies, as documented by some European earthquakes [23].

An alternative to spectral shapes are attenuation equations applicable to spectral amplitudes [34, 20, 28, 9], thereby directly defining spectral response parameters as a function of magnitude, distance, frequency and sometimes soil condition.

The level of damping and the number of damping values for which response spectra should be specified to represent the MDE, OBE or RIE should encompass a range of values applicable to the type of dam and level of ground motion considered. For example, damping values for the analysis of concrete dams typically range from 3 to 10 percent, depending on whether the response is assumed to be predominantly elastic or whether non-linearities, such as cracking of the concrete, are indirectly included in the analysis by assuming a higher level of damping. Damping values for the analysis of embankment dams range from 5 to 20 percent but for strong shaking are in a range higher than 15 percent.

For the purposes of characterizing ground motion and comparing various earthquakes, 5 percent damping is the most commonly used value, principally because generalized spectral shapes for that damping value are the most available.

4. ACCELERATION TIME HISTORIES

The definition of seismic parameters by peak values and spectral characteristics is sufficient for many dam applications. Evaluation of critical dams and non-linear

L'étude des barrages critiques et la technique des calculs non linéaires exigent, cependant, la définition du mouvement sismique dans le domaine du temps, sous la forme des évolutions, dans le temps, des accélérations enregistrées. Il est recommandé d'utiliser plusieurs évolutions des accélérations dans le temps pour représenter chacun des SMD, SBE ou SIR, car certaines évolutions montrent une valeur énergétique moindre pour certaines fréquences et leur utilisation peut aboutir à une analyse insuffisamment prudente. Les évolutions des accélérations peuvent être définies pour le mouvement horizontal et/ou le mouvement vertical, et seront représentées de préférence par des accélérogrammes réels obtenus dans des conditions de site identiques à celles existant sur le site du barrage considéré.

Comme les données sur les fortes secousses sismiques, couramment disponibles, ne couvrent pas le champ complet des conditions possibles, ces enregistrements doivent souvent être complétés par des mouvements artificiels représentant des grandeurs de séismes et des environnements sismotectoniques quelconques. Les tremblements de terre artificiels peuvent être établis par des méthodes de superposition, par des procédés stochastiques, ou par une simulation mathématique de rupture de faille.

Mais on doit souligner que la méthode la plus sûre pour obtenir les données de base, permettant de connaître les caractéristiques des mouvements sismiques agissant sur les barrages, est de recueillir des enregistrements réels des séismes et de mettre en place des dispositifs d'enregistrement des fortes secousses sismiques.

4.1. Méthodes de superposition

La manière la plus simple de produire des enregistrements, de durée et valeur de pointe déterminées, est d'utiliser plusieurs tranches des enregistrements réels de séismes, ramenés à l'échelle des amplitudes en utilisant des facteurs appropriés. Un exemple bien connu de ce procédé est le séisme Seed-Idriss (1968), qui comprend un assemblage de portions d'accélérogrammes réels destiné à simuler le mouvement sismique, au niveau du rocher de fondation, résultant de la rupture progressive d'une longue faille avec décrochement le long de tranches successives pendant un fort séisme. Une modification des enregistrements sismiques réels, en comprimant ou dilatant l'échelle du temps, est possible, mais doit être réalisée avec beaucoup de soin, car l'évolution, dans le temps, des accélérations résultantes peut montrer une relation de phase irréelle. Des déphasages choisis peuvent aussi représenter la propagation d'une rupture le long d'une faille unique [47]. Tous les séismes artificiels, obtenus par la méthode de superposition ou par d'autres méthodes, doivent être corrigés à la base afin d'éliminer les dérives de période longue dans les enregistrements de leurs vitesses et déplacements, de la même manière que l'on corrige les enregistrements réels.

Une autre application de la méthode de superposition est la simulation des ondes soutenues d'accélérations et de vitesses, comme cela a été observé dans plusieurs enregistrements dans le champ proche [5]. La détente élastique et le passage de la dislocation de la faille près du site sont considérés comme principal responsable de la manifestation de tels phénomènes.

Une autre méthode consiste, à partir d'une évolution réelle des accélérations dans le temps, à la transformer en un domaine de fréquences en utilisant une formule de Fourier et à ajuster certaines amplitudes de Fourier du mouvement transformé, en gardant les angles de phase initiaux. Les amplitudes de Fourier modifiées et les

analysis techniques require, however, the specification of earthquake motion in the time domain as acceleration time history records. It is recommended that several acceleration time histories be used to represent either of the MDE, OBE or RIE, as certain time histories have a lower energy content at some frequencies and their use may result in an unconservative analysis. Acceleration time histories may be specified for horizontal and/or vertical motion and should preferably be represented by real accelerograms obtained for site conditions similar to those present at the dam site under consideration.

Since the strong ground motion data currently available do not cover the whole range of possible conditions, such records must often be supplemented by synthetic motions representing any earthquake size and seismotectonic environment. Synthetic earthquakes can be developed by superposition methods, by stochastic processes, or by mathematical simulations of fault rupture.

But it should be emphasized that collecting actual earthquake records and establishing observation systems for recording strong ground motions and accumulating these records is the surest way of obtaining basic data for clarification of the properties of earthquake motions acting on dams.

4.1. Superposition Methods

The simplest way to produce records of specified duration and peak values is to use several segments of actual earthquake records, scaled in amplitude as necessary by using appropriate factors. A well-known example of this procedure is the Seed-Idriss Earthquake (1968), which comprises an assemblage of portions of real accelerograms intended to simulate the seismic motion, at bedrock level, resulting from the progressive breakage of a long strike-slip fault along successive segments during a large earthquake. Modification of real earthquake records by compressing or expanding the time-scale is possible, but must be done with great care, as the resulting acceleration time history may show an unrealistic phase relationship. Selected phase delays can also represent propagation of the rupture along a single fault [47]. All artificial earthquakes, obtained by superposition or other methods, must be base-line corrected to eliminate long-period drifts in their velocity and displacement records in the same manner as actual recordings are corrected.

Another application of the superposition method is to simulate specific, sustained acceleration and velocity pulses, as have been observed in several near-field records [5]. The elastic rebound and the passage of the fault dislocation near the site are considered to be primarily responsible for the occurrence of such pulses.

As a variation of the superposition method, it is possible to start from a real acceleration time history, convert it into the frequency domain using a Fourier transform, and selectively adjust some of the Fourier amplitudes of the converted motion while preserving the original phase angles. The modified Fourier amplitudes and original phase angles are then recombined into the time domain, using a reverse

angles de phase initiaux sont alors recombinés dans le domaine du temps, en utilisant la transformation inverse de Fourier. L'évolution nouvelle des accélérations dans le temps ressemblera, en général, à l'évolution initiale dans le temps, mais comprendra moins de défauts spectraux. De cette manière, une concordance entre l'évolution des accélérations dans le temps et la forme spectrale spécifiée peut être obtenue.

4.2. Procédés stochastiques

Du fait que les accélérogrammes enregistrés ont souvent l'apparence de fonctions de temps fortuites, on a mis au point des méthodes de calcul utilisant le bruit blanc, le bruit blanc filtré ou le bruit blanc filtré non-stationnaire, pour représenter le mouvement sismique. Le principal avantage des évolutions des accélérations dans le temps, déterminées par des procédés stochastiques, est l'absence générale de défauts spectraux, mais souvent au prix d'un nombre excessif d'ondes d'accélérations et de relations de phase non réalistes.

Les évolutions stochastiques des accélérations dans le temps ne doivent pas être utilisées sans discernement pour les calculs de barrages et l'ingénieur devra faire preuve d'un immense bon sens, particulièrement dans le cas des barrages en remblai, car leur comportement dépend directement du nombre de cycles de contraintes induites, plutôt que des valeurs de pointe des contraintes. Les calculs des barrages en béton sont moins sensibles à l'utilisation des évolutions stochastiques des accélérations dans le temps, comme données de mouvement sismique. Les évolutions stochastiques dans le temps ne sont recommandées pour aucun type de calculs non linéaires.

4.3. Modèles de rupture de faille

Le mouvement du sol peut être estimé en supposant que la rupture de la faille se produira le long de surfaces successives, ou coins, sur une partie de sa longueur et entre des profondeurs limitées. Des considérations empiriques, géophysiques et mécaniques peuvent être utilisées pour simuler le mouvement du sol dû à la rupture progressive de failles, moyennant des méthodes numériques complexes impliquant des processus fortuits ou déterministes de glissement le long de surfaces élémentaires (coins). Ces méthodes, examinées par Aki [1], semblent fournir des estimations raisonnables des caractéristiques des secousses du sol, dans l'espace et dans le temps, en fonction des magnitudes, mais leur validité doit être mieux définie avant de les utiliser dans les calculs de barrages. La méthode est mentionnée ici à titre d'information.

5. ÉVALUATION PROBABILISTE DU RISQUE SISMIQUE

L'évaluation probabiliste du risque sismique (appelée aussi évaluation de l'exposition aux séismes) comprend la détermination, par des méthodes mathématiques et statistiques, de la relation entre un paramètre de mouvement du sol et la probabilité de son dépassement au site du barrage au cours d'un intervalle de temps déterminé (par exemple la durée d'utilisation de la retenue). La valeur du paramètre de mouvement du sol à utiliser pour l'évaluation de la sécurité du barrage vis-à-vis des séismes est alors choisie après avoir défini un niveau acceptable de probabilité pour l'ouvrage et le site considérés. Les failles reconnues actives (ou potentiellement

Fourier transform. The new acceleration time history will generally resemble the original time history, but will include fewer spectral deficiencies. In such manner, compliance of the acceleration time history with a specified spectral shape can be obtained.

4.2. Stochastic Processes

Because recorded accelerograms often have the appearance of random time functions, calculation methods have been developed that use white noise, filtered white noise, or non-stationary filtered white noise to represent earthquake motion. The main advantage of stochastic acceleration time histories is their general lack of spectral deficiencies, but often at the cost of exhibiting excessive numbers of acceleration pulses and unrealistic phase relationships.

Stochastic acceleration time histories should not be used indiscriminately for dam analyses, and the engineer should exercise considerable judgement, especially in the case of embankment dams, whose performance directly depends on induced stress cycles rather than peak stress values. Concrete dam analysis is less sensitive to the use of stochastic acceleration time histories as input motion. Stochastic time histories are not recommended for any type of nonlinear analysis.

4.3. Fault-Rupture Models

Ground motion may be estimated by assuming that a fault will progressively rupture along successive surfaces, or patches, along part of its length and between limiting depths. Empirical geophysical and mechanical considerations can be used to simulate the ground motion due to the progressive rupture of faults through complex numerical procedures involving random or deterministic elementary patch slippage processes. These procedures, reviewed by Aki [1], seem to provide reasonable estimates of the spatial and temporal characteristics of ground shaking as a function of magnitude, but need to be further evaluated prior to being used on a routine basis for dam analysis. The method is mentioned here primarily for informative purposes.

5. PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD EVALUATION

A probabilistic seismic hazard evaluation (also called a seismic exposure evaluation) involves obtaining, through mathematical and statistical processes, the relationship between a ground motion parameter and its probability of exceedance at the dam site during a specified interval of time (such as the operating life of the reservoir). The value of the ground motion parameter to be used for the seismic safety evaluation of the dam is then selected after defining an acceptable level of probability for the structure and site considered. Recognized active, or potentially active, faults and seismic provinces are referred to as seismic sources. A seismic

actives) et les régions sismiques sont considérées comme sources sismiques. Une région sismique est considérée comme une région où l'emplacement des failles actives n'est pas bien connu, mais où l'on peut raisonnablement supposer que l'activité sismique est distribuée au hasard. La relation spatiale entre le site du barrage et la (les) source(s) sismique(s) concernant le site, et les niveaux d'activité attribués à chaque source sismique forment les éléments de base pour le modèle du risque sismique du site considéré. Ce modèle devra être compatible avec la structure géologique et tectonique de la zone étudiée et avec les niveaux historiques et géologiques de l'activité sismique, établis pour les failles considérées.

L'évaluation du risque sismique d'un site, dû à une source unique, implique la prise en considération de trois fonctions de probabilité [12, 13, 14, 16, 31, 33, 36] :

- (1) La probabilité qu'un tremblement de terre d'une magnitude particulière se manifestera à cette source pendant l'intervalle de temps spécifié.
- (2) La probabilité que la rupture associée à cette source et à un événement d'une certaine magnitude apparaîtra à une distance déterminée par rapport au site.
- (3) La probabilité que le mouvement du sol dû à un séisme d'une certaine magnitude, se manifestant à une certaine distance, dépassera un niveau spécifié sur le site.

En combinant les trois fonctions de probabilité pour chaque source et en cumulant les contributions de toutes les sources, la probabilité de dépasser un niveau spécifié de mouvement du sol, sur le site, est calculée pour l'intervalle de temps défini.

L'utilisation d'une évaluation probabiliste du risque sismique offre, par rapport à l'approche déterministe, les avantages suivants :

- (a) les contributions des séismes, allant de la plus petite magnitude jusqu'à (et y compris) la plus grande magnitude à chaque source, sont incluses;
- (b) les contributions de toutes les sources et de toutes les distances sont incluses;
- (c) les résultats fournissent les moyens de choisir les paramètres de projet qui peuvent conduire à des niveaux comparables de risque sur deux ou plusieurs sites. Pour les sites de barrages, la probabilité que se produise le SMD sera déterminée d'après l'examen complet, non seulement des données concernant la sismicité du site du barrage, le type et la destination du barrage, et sa vie utile prévue, mais aussi du niveau de risque de l'ouvrage (voir chapitre 5.3).

Il faut noter que, dans une évaluation probabiliste du risque sismique, un poids égal est attribué à toutes les magnitudes. Pour la plupart des barrages, et pour les barrages en remblai en particulier, le niveau de secousses causées par un séisme de grande magnitude est beaucoup plus grave que le même niveau de secousses causées par une magnitude considérablement plus basse, à cause des effets de la durée.

Cet aspect du problème peut être abordé en utilisant des facteurs appropriés de pondération de magnitude pour les ordonnées spectrales et les accélérations [23].

province is considered to be an area where the location of active faults is not well known, but where the seismic activity may be reasonably assumed to be randomly distributed. The spatial relationship between the dam site and the seismic source(s) of concern to the site, and the rates of activity assigned to each seismic source, form the basic elements of the seismic hazard model of the site considered. Such model should be consistent with the geologic and tectonic setting of the area under investigation and with the historic and geologic rates of seismic activity that have been established for the faults included.

The evaluation of the seismic hazard at a site due to a single source involves convoluting three probability functions [12, 13, 14, 16, 31, 33, 36] :

- (1) The probability that an earthquake of a particular magnitude will occur on this source during a specified time interval.
- (2) The probability that the rupture associated with this source and a certain magnitude event occurs at a specified distance from the site.
- (3) The probability that the ground motions from an earthquake of a certain magnitude occurring at a certain distance will exceed a specified level at the site.

By combining the three probability functions for each source and adding up the contributions of all sources, the probability of exceeding a specified level of ground motion at the site is computed for the specified time interval.

The advantages of using a probabilistic seismic hazard evaluation, over a deterministic approach, include the following :

- (a) contributions from earthquakes ranging in magnitude from the smallest magnitude of concern up to and including the maximum magnitude on each source are included;
- (b) contributions from all sources and all distances are included; and
- (c) the results provide the means to select design parameters that can produce comparable degrees of risk at two or more sites. For dam sites, the probability of occurrence of MDE should be determined upon a comprehensive examination not only of data concerning seismicity of the dam site, the type and purpose of the dam and the planned service life, but also the risk rating of the structure (see section 5.3).

It should be noted that, in a typical probabilistic seismic hazard evaluation, all magnitudes are assigned equal weight. For most dams, and embankment dams in particular, the level of shaking caused by a large magnitude earthquake is far more serious than the same level of shaking caused by a much smaller magnitude earthquake because of the duration effects.

That aspect of the problem can be addressed by using appropriate magnitude weighting factors for acceleration and spectral ordinates [23].

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : juillet 1989
Nº 14673
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>