

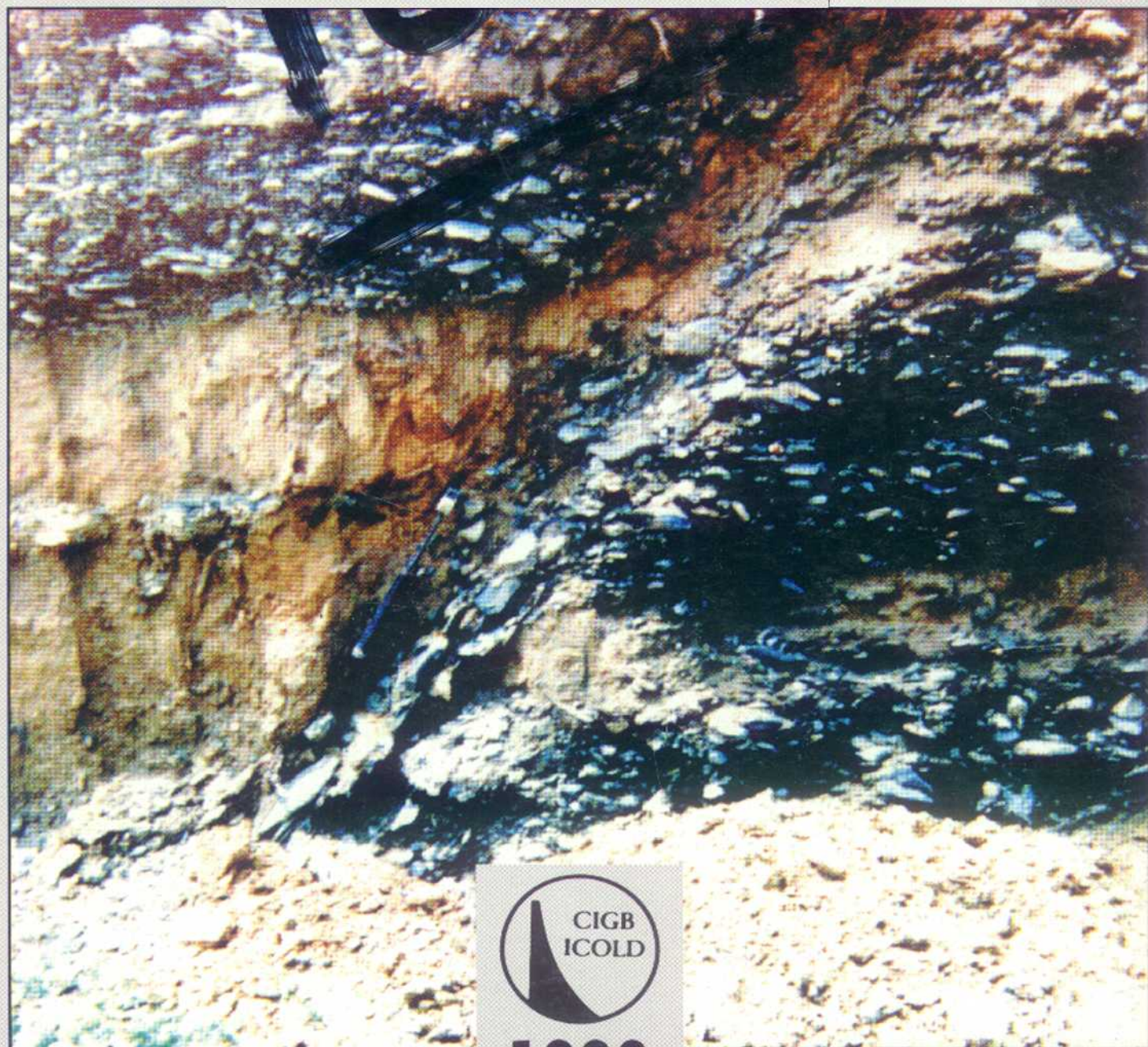
NEOTECTONICS AND DAMS

Guidelines and case histories

NÉOTECTONIQUE ET BARRAGES

Recommandations et exemples

Bulletin 112



1998

Original text in English
French version finalized by Y. Le May.

*Texte original en anglais
Version française mise au point par Y. Le May.*

NEOTECTONICS AND DAMS

Guidelines and case histories

COMMISSION INTERNATIONALE

DES

GRANDS BARRAGES

151, Boulevard Haussmann

75008 PARIS

NÉOTECTONIQUE ET BARRAGES

Recommandations et exemples

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33) 01 53 75 16 52 - Fax : (33) 01 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 SISMQUES DES PROJETS DE BARRAGES
(1997-1999)

Chairman/Président

Yugoslavia/Yougoslavie A. BOZOVIC

Members/Membres

Algeria/Algérie	K. BENSEGHIER
Argentina/Argentine	J. CARMONA
Australia/Australie	R. FELL
Chile/Chili	G. NOGUERA
China/Chine	H. SHEN
Costa Rica	L. LLACH
Egypt/Égypte	A. M. SHALABY
For. Yug. Rep. of Macedonia/ Ex-Rép. Youg. de Macédoine	V. MIHAILOV
France	J. J. FRY
Iran	A. MAHDAVIAN
Italy/Italie	A. CASTOLDI
Japan/Japon	C. TAMURA
Korea/Corée (ROK)	Y. W. CHUN (1) Y. S. CHOI (2)
Mexico/Mexique	M. ROMO
Norway/Norvège	K. HOEG
Pakistan	A. AGHA
Portugal	A. J. C. MINEIRO
Russia/Russie	A. N. MARCHUK
Switzerland/Suisse	M. WIELAND
United Kingdom/Royaume-Uni	R. T. SEVERN
USA/États-Unis	J.L. EHASZ

(1) Member until 1998/Membre jusqu'en 1998
(2) Member since 1998/Membre depuis 1998

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. ÉTUDE DE L'ACTIVITÉ DES FAILLES
 3. PRÉVISION DES MOUVEMENTS FUTURS DE FAILLES
 4. EFFETS EN SURFACE DES MOUVEMENTS DE FAILLES
 5. ÉVALUATION DES EFFETS DES MOUVEMENTS DE LA CROÛTE TERRESTRE SUR LES BARRAGES
 6. RUPTURE DE FAILLES EN SURFACE SUR LE SITE ET MOUVEMENTS ASSOCIÉS
 7. INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ TECTONIQUE SUR LE CHOIX DU SITE DE BARRAGE, DU TYPE DE BARRAGE ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES
 8. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
 9. EXEMPLES D'ACTIVITÉ TECTONIQUE CONTEMPORAINE AFFECTANT DES SITES DE BARRAGES ET DES BARRAGES EXISTANTS
 10. RÉFÉRENCES

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. INVESTIGATION OF FAULTS ACTIVITY
 3. PREDICTABILITY OF FUTURE FAULT MOVEMENTS
 4. SURFACE EFFECTS OF FAULT MOVEMENTS
 5. EVALUATING THE EFFECTS OF CRUSTAL MOVEMENTS ON DAMS
 6. ON-SITE SURFACE FAULTING AND RELATED MOVEMENTS
 7. EFFECTS OF ACTIVE TECTONIC FEATURES ON SELECTION OF DAM SITE, TYPE OF DAMS AND CONSTRUCTION DETAILS
 8. SUMMARY AND CONCLUSIONS
 9. CASE HISTORIES OF CONTEMPORANEOUS TECTONIC ACTIVITY ON DAM SITES AND EXISTING DAM STRUCTURES
 10. REFERENCES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. INTRODUCTION	12
1.1. Objet et domaine concerné	12
1.2. Définition du problème	12
1.2.1. Structure des ruptures affectant les barrages et les retenues	14
1.2.2. Influence de la cinématique de fracturation	16
1.2.3. Effets possibles des failles existantes	18
2. ÉTUDE DE L'ACTIVITÉ DES FAILLES	20
2.1. Région à étudier	20
2.2. Méthodologie des études	20
2.2.1. Détermination du système de failles et de ruptures	20
2.2.2. Détermination de l'activité néotectonique	22
2.2.3. Détermination de l'activité tectonique récente	24
2.2.4. Détermination de l'activité contemporaine des failles	24
2.2.5. Documentation sur l'activité tectonique des failles	30
3. PRÉVISION DES MOUVEMENTS FUTURS DE FAILLES	34
3.1. Datation des mouvements de failles survenus dans le passé	34
3.2. Évidence historique	36
3.3. Possibilité de prévision des mouvements de failles	36
3.4. Détection de failles actives à partir de la sismicité induite	36
4. EFFETS EN SURFACE DES MOUVEMENTS DE FAILLES	38
4.1. Détails des ruptures de failles	38
4.2. Cinématique des ruptures de failles	38
5. ÉVALUATION DES EFFETS DES MOUVEMENTS DE LA CROÛTE TERRESTRE SUR LES BARRAGES	42
6. RUPTURE DE FAILLES EN SURFACE SUR LE SITE ET MOUVEMENTS ASSOCIÉS	46
7. INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ TECTONIQUE SUR LE CHOIX DU SITE DE BARRAGE, DU TYPE DE BARRAGE ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES	50

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	11
1. INTRODUCTION	13
1.1. Objective and scope	13
1.2. Definition of the problem.....	13
1.2.1. Rupturing structures affecting dams and storages.....	15
1.2.2. Influence of fracture kinematics.....	17
1.2.3. Possible effects of existing faults.....	19
2. INVESTIGATION OF FAULTS ACTIVITY	21
2.1. Region to be investigated.....	21
2.2. Investigation methodology.....	21
2.2.1. Determination of the system of faults and ruptures.....	21
2.2.2. Determination of neotectonic activity.....	23
2.2.3. Determination of recent tectonic activity.....	25
2.2.4. Determination of contemporaneous activity of faults.....	25
2.2.5. Documenting the tectonic activity of faults.....	31
3. PREDICTABILITY OF FUTURE FAULT MOVEMENTS.....	35
3.1. Age dating of the past fault movements.....	35
3.2. Historic evidence.....	37
3.3. Possibility of predicting fault movements.....	37
3.4. Triggered seismicity as detector of active features.....	37
4. SURFACE EFFECTS OF FAULT MOVEMENTS	39
4.1. Details of fault breaks.....	39
4.2. Kinematics of fault breaks.....	39
5. EVALUATING THE EFFECTS OF CRUSTAL MOVEMENTS ON DAMS.....	43
6. ON-SITE SURFACE FAULTING AND RELATED MOVEMENTS	47
7. EFFECTS OF ACTIVE TECTONIC FEATURES ON SELECTION OF DAM SITES, TYPE OF DAMS AND CONSTRUCTION DETAILS	51

7.1. Influence sur le choix du site de barrage	50
7.2. Influence sur le projet de barrage	52
8. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.....	54
9. EXEMPLES D'ACTIVITÉ TECTONIQUE CONTEMPORAINE AFFECTANT DES SITES DE BARRAGES ET DES BARRAGES EXISTANTS	58
9.1. Barrage San Andreas (États-Unis)	58
9.2. Barrage Upper Crystal Springs (États-Unis).....	60
9.3. Barrage Lower Crystal Springs (États-Unis).....	60
9.4. Barrage Hebgen (États-Unis).....	60
9.5. Réservoir Baldwin Hills (États-Unis).....	62
9.6. Barrage Nurek (Tadjikistan).....	62
9.7. Barrage Rogun (Tadjikistan).....	62
9.8. Barrage Bajina Basta (Yougoslavie).....	66
9.9. Barrage Lipovica (Yougoslavie).....	74
9.10. Barrage Mratinje (Yougoslavie).....	78
9.11. Barrage Tarbela (Pakistan).....	84
9.12. Barrage Matahina (Nouvelle-Zélande).....	88
10. RÉFÉRENCES.....	94

7.1. Influence on selection of dam sites	51
7.2. Effect on the design.....	53
8. SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	55
9. CASE HISTORIES OF CONTEMPORANEOUS TECTONIC ACTIVITY ON DAM SITES AND EXISTING DAM STRUCTURES.....	59
9.1. San Andreas Dam (USA)	59
9.2. Upper Crystal Springs Dam (USA).....	61
9.3. Lower Crystal Springs Dam (USA).....	61
9.4. Hebgen Dam (USA).....	61
9.5. Baldwin Hills Reservoir (USA).....	63
9.6. Nurek Dam (Tajikistan).....	63
9.7. Rogun Dam (Tajikistan)	63
9.8. Bajina Basta Dam (Yugoslavia).....	67
9.9. Lipovica Dam (Yugoslavia).....	75
9.10. Mratinje Dam (Yugoslavia).....	79
9.11. Tarbela Dam (Pakistan).....	85
9.12. Matahina Dam (New Zealand)	89
10. REFERENCES	94

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig. 1 - Barrage San Andreas - Emplacement de la rupture de la faille
- Fig. 2 - Barrage Hebgen - Coupe longitudinale passant par le barrage et la faille
- Fig. 3 - Coupe transversale du barrage Rogun
- Fig. 4 - Coupe longitudinale du barrage Bajina Basta
- Fig. 5 - Disposition générale du barrage Bajina Basta
- Fig. 6 - Arrière-plan tectonique du barrage Bajina Basta
- Fig. 7 - Disposition générale du barrage Lipovica
- Fig. 8 - Disposition générale du barrage Mratinje
- Fig. 9 - Barrage Mratinje - Carte des épicentres correspondant à la période de pointe de sismicité induite
- Fig. 10 - Vue en plan générale du barrage Tarbela
- Fig. 11 - Vallée alluviale profonde au barrage Tarbela
- Fig. 12 - Coupe transversale du barrage Matahina, selon le projet initial
- Fig. 13 - Situation de la faille Waiohau par rapport au site du barrage Matahina
- Fig. 14 - Situation des branches de la faille Waiohau sur le site du barrage Matahina
- Fig. 15 - Coupe transversale du barrage Matahina après le renforcement

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1 - San Andreas Dam - Location of main fault break
- Fig. 2 - Hebgen Dam - Longitudinal section through dam and fault
- Fig. 3 - Rogun Dam cross section
- Fig. 4 - Longitudinal section through Bajina Basta Dam
- Fig. 5 - Layout of Bajina Basta Dam
- Fig. 6 - Tectonic background of Bajina Basta Dam
- Fig. 7 - Lipovica Dam layout
- Fig. 8 - Layout of Mratinje Dam
- Fig. 9 - Mratinje Dam - Epicentral map for the peaking period of induced seismicity
- Fig. 10 - Tarbela Dam general layout plan
- Fig. 11 - Deep alluvial filled valley at Tarbela Dam
- Fig. 12 - Cross section of Matahina Dam, according to original design
- Fig. 13 - Waiohau fault location in relation to the Matahina Dam site
- Fig. 14 - Location of the Waiohau fault strands on the Matahina Dam site
- Fig. 15 - Cross section of Matahina Dam as it will be after the strengthening measures

AVANT-PROPOS

L'exposition des barrages à des phénomènes tectoniques encore actifs à l'époque actuelle (incluant les secousses sismiques, les ruptures de failles en surface et la mobilité de la croûte terrestre sous forme de fluage) constitue un risque très grave pouvant affecter la sécurité de ces ouvrages.

Beaucoup d'attention et d'études sont consacrées à la réponse des barrages aux secousses sismiques.

Bien que comprise et identifiée depuis très longtemps, la menace de rupture de failles en surface et de mobilité de la croûte terrestre sous forme de fluage a été examinée à une échelle beaucoup plus restreinte.

Le présent Bulletin considère spécifiquement :

- Les événements tectoniques de rupture et de fluage pouvant affecter les barrages et les retenues.
- La méthodologie des reconnaissances s'y rapportant.
- L'évaluation des effets de la rupture de failles et de la mobilité de la croûte terrestre sur les barrages.
- L'influence de l'activité tectonique sur le choix des sites et des types de barrages.
- La définition de la stratégie de l'ingénieur confronté à de tels phénomènes tectoniques.

Ce Bulletin a été préparé par A. Bozovic et Prof. Dr. M. Markovic, et a été mis au point après une discussion approfondie au sein du Comité des Aspects Sismiques des Projets de Barrages.

Les conclusions et recommandations présentées dans le Bulletin sont corroborées par une série d'exemples faisant l'objet d'un chapitre spécial.

Le Bulletin sera d'une grande utilité pour l'évaluation des phénomènes de mobilité de la croûte terrestre (ruptures de failles et mouvements de fluage), susceptibles d'affecter des barrages existants ou futurs.

A. BOZOVIC

Président du Comité des Aspects Sismiques
des Projets de Barrages

FOREWORD

Exposure of dams to tectonic phenomena active at present time (including seismic shaking, fault breaking and crustal mobility in creep form) constitutes the most drastic hazard affecting the structural safety of dams.

Much effort and analysing is dedicated to the response of dams to seismic shaking.

Although understood and identified considerable time ago, the threat of surface fault breaking and creeping crustal mobility were commented and generalized on a far lesser scale.

This Bulletin considers specifically :

- Rupturing and creeping tectonic events which might affect dams and storages.
- The related investigation methodology.
- Evaluating the effects of fault breaks and crustal mobility on dams.

- Effects of active tectonic features on selection of sites and types of dams.

- Defining the engineering strategy when facing the active tectonic rupturing and creeping movements.

This Bulletin was drafted by A. Bozovic and Prof. Dr. M. Markovic and finalized after comprehensive discussion and reviewing in the Committee on Seismic Aspects of Dam Design.

Its findings and conclusions are supported by a set of case histories given in a special chapter.

It is considered that this Bulletin shall be a substantial help in evaluating the crustal mobility phenomena (fault breaks and creep movements) which might affect existing and future dam structures.

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

1. INTRODUCTION

1.1. OBJET ET DOMAINE CONCERNÉ

Le problème d'évaluation de l'influence possible des phénomènes tectoniques contemporains sur les ouvrages d'art est depuis longtemps présent dans les travaux des ingénieurs. Les ouvrages sont en général calculés en tenant compte de l'action des secousses sismiques, car c'est la forme la plus fréquente sous laquelle la tectonique contemporaine se manifeste aux ingénieurs et au public. La manifestation la plus dangereuse, concernant la stabilité et l'intégrité d'un barrage, est la rupture d'une faille traversant le site du barrage. Mais les mouvements de fluage de l'écorce terrestre, sous l'effet des forces tectoniques, sont aussi présents. Dans la plupart des cas on néglige tacitement ces effets, vu la rareté extrême des cas où la rupture de failles ou des mouvements dus au fluage tectonique ont directement agi sur des barrages. Le comportement de l'ensemble des barrages justifie, du point de vue statistique, une telle pratique car très peu de barrages ont été endommagés par des mouvements dus au fluage tectonique, et de fait aucun par la rupture d'une faille passant sous le barrage (celle-ci étant la situation la plus sévère imaginable pouvant affecter l'intégrité de barrages existants). Toutefois, quelques exemples montrent que le risque de rupture d'une faille active n'a pas une probabilité nulle et devra être pris en considération chaque fois que les conditions tectoniques indiquent une telle possibilité. On doit aussi se rappeler que non seulement la rupture brutale d'une faille, mais aussi les déformations de fluage (le long d'une faille ou sur des zones où les contraintes tectoniques induisent des déformations du massif rocheux), peuvent compromettre l'intégrité d'un barrage.

Il est par conséquent justifié, dans le cas de manifestations tectoniques contemporaines, de considérer généralement la mobilité de la croûte terrestre, incluant la rupture de failles et le fluage lent le long de tracés linéaires ou sur la surface du terrain.

Les observations et les expériences recueillies jusqu'à présent soulignent la nécessité de prendre en considération et d'évaluer le potentiel de mobilité de la croûte terrestre affectant des sites ou des barrages existants; il y a lieu également de définir la réaction optimale en présence de ces phénomènes complexes et les mesures à prendre pour y faire face, ce qui ne va pas sans difficultés.

1.2. DÉFINITION DU PROBLÈME

Les mouvements tectoniques se produisant dans la croûte terrestre provoquent généralement la formation de ruptures et de mouvements de masse intéressant de larges zones. Les deux formes mentionnées constituent les phénomènes de mobilité de la croûte terrestre, affectant les sites de barrages et les retenues. La collecte et l'évaluation des informations disponibles sur ces phénomènes, et leur prise en

1. INTRODUCTION

1.1. OBJECTIVE AND SCOPE

The question of evaluating the possible influence of contemporaneous tectonic phenomena on man-made structures is present for a long time in engineering practice. Structures are being mainly analysed under the influence of seismic shaking, this being the most frequent form in which the present days tectonics is impressed upon engineers and general public. The most dangerous manifestation concerning the dam stability and integrity is the surface fault breaking, intersecting the dam site. But creeping crustal movements as a consequence of acting tectonic forces are also present. In most cases both effects are tacitly disregarded due to extreme scarcity of cases in which the fault breaking or creep movements directly influenced dam sites or structures. The overall record of dams behavior validates statistically such practice, since very few dams were damaged by creeping crustal mobility and virtually none by fault breaking under the dam (this being about the most severe influence imaginable affecting the structural integrity of existing dams). Still a few near misses indicate that active fault breaking is not of negligible probability and should be taken in consideration whenever tectonic conditions indicate such a possibility. And it should be also kept in mind that not only abrupt fault breaking can adversely influence the dam integrity, but also the creeping deformations (along fault lines or over areas where tectonic stresses are inducing rock mass deformations).

It is therefore justified, when speaking of present tectonic manifestations, to consider generally the crustal mobility which includes fault breaks and slower creep movements along linear or over areal features of the earth crust.

Records and experiences accumulated to present day point to the necessity of taking in consideration and evaluating the crustal mobility potential affecting the dam sites or existing dams; also of clarifying the optimum engineering reaction, while facing these complex phenomena and related decision making, both rather difficult to handle.

1.2. DEFINITION OF THE PROBLEM

The tectonic movements evolving in the earth crust result generally in the formation of rupturing structures and in areal movements. Both mentioned forms constitute the crustal mobility phenomena, affecting and influencing also the regions of dam sites and storages. Investigating, collecting and evaluating available information on such features and considering them in a reasonably conservative

compte d'une manière raisonnablement prudente dans les projets de barrages constituent des bases en vue de l'obtention d'ouvrages sûrs et fiables.

1.2.1. Structure des ruptures affectant les barrages et les retenues

Les failles actives et les mouvements de surface ont des conséquences directes sur la sécurité et l'intégrité des barrages et constituent donc le point principal d'intérêt.

La propriété fondamentale d'une faille susceptible de produire une rupture de surface (ou faille « capable » suivant l'expression utilisée par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique) est une probabilité raisonnable de rupture de surface pendant la vie du barrage.

Les failles dont l'activité peut être considérée comme néotectonique sont celles dont les dernières ruptures de surface se sont produites pendant le Néogène – Quaternaire, les failles actives récentes ayant eu des ruptures de surface pendant la période Holocène. Les failles actives contemporaines présentent des signes évidents de rupture de surface.

Étant donné que les fondations de barrages sont en général traversées par maintes failles et que pas un seul barrage n'a été cisailé par une rupture de faille, il s'ensuit qu'un tel événement est extrêmement rare. *D'autre part, la connaissance et l'acceptation d'une faille « capable » dans la fondation d'un barrage nécessite des mesures rigoureuses. Le site devra être de préférence abandonné en faveur d'un emplacement tectoniquement plus stable.* Si ce n'est pas possible, un barrage en remblai, de conception prudente, pourra être une solution acceptable, capable de supporter les effets de la rupture d'une faille active.

Il est évident qu'une telle décision est très difficile à prendre et comporte de grandes responsabilités. Par conséquent, la définition des conditions sous lesquelles une faille doit être considérée comme active est très délicate et impose des limites sévères au projet du barrage en question.

Cette définition est donnée dans le *Bulletin* 72 (1989) de la CIGB :

Une faille active est une faille valablement identifiée et déterminée en position, qui est connue pour avoir produit des mouvements 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.

La définition formulée par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (Vienne, 1979) se présente comme suit :

Une faille est considérée comme « capable » si :

a) Elle montre des signes évidents de mouvements, de nature répétitive, sur ou près de la surface, survenus au cours de la période d'environ un demi-million d'années avant l'époque actuelle, de sorte que la possibilité de mouvements ultérieurs peut être prévue.

manner in the designs of dams is one of the cornerstones of obtaining reliable and safe structures.

1.2.1. Rupturing Structures Affecting Dams and Storages

Active faults and active areal movements are of direct consequence from the viewpoint of dams safety and integrity and therefore constitute our main point of interest.

The basic property of an active fault with surface breaking capability (or “capable” fault in terms used by the International Atomic Energy Agency) is a reasonable probability of producing a surface break during the lifetime of the dam.

Neotectonically active faults are those with latest surface breaks during Neogene-Quaternary while recent active faults have breaks in the Holocene Epoch. Contemporaneous active faults have historic evidence of surface breaking.

Since dam foundations in general are crossed by many faults and not a single one (although there were a few near misses) ever had its body sheared by a fault break, it is obvious that such an event is extremely infrequent. On the other hand, *recognizing and accepting the existence of a capable fault in the dam foundation requires drastic steps. The site should preferably be abandoned in favor of a tectonically more stable one.* If that is not viable, then a conservatively designed embankment dam might be an acceptable solution able to survive the fault break effects.

It is evident that such decisions are very difficult and entail large responsibilities. Therefore the definition of conditions under which a fault should be considered active is very sensitive and quite limiting for the dam design in question.

Such definition, given in ICOLD *Bulletin* No. 72 (1989), is :

A fault, reasonably identified and located, known to have produced historical fault movements 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.

The definition formulated by the International Atomic Energy Agency (Vienna 1979) reads as follows :

A fault is considered capable if :

a) It shows evidence of movements of recurring nature at or near the surface, within about half a million years before the present, such that the possibility of further movement can be inferred.

b) Elle possède une relation structurale démontrée avec une faille capable connue, de sorte que le mouvement d'une faille peut causer le mouvement de l'autre sur ou près de la surface.

Cette définition est prudente, comme elle doit l'être pour les centrales nucléaires où tous dégâts sérieux sont pratiquement inacceptables.

Mais la situation concernant les barrages est différente dans une certaine mesure. Quand un barrage est exposé à des sollicitations sismiques extrêmes (et la rupture d'une faille en surface est un tel cas extrême), on considère qu'un certain niveau de dégâts est acceptable, à condition que la rupture du barrage suivie d'une crue catastrophique soit évitée.

Une telle pratique n'est pas acceptable dans le cas des centrales nucléaires dont l'intégrité structurale doit rester suffisante.

Cette distinction laisse présumer l'application de critères quelque peu moins rigoureux. Comme le montre l'activité tectonique, les traces les plus significatives et les plus apparentes de mouvements récents de failles (11 000 dernières années) appartiennent à la période Holocène.

En remontant davantage dans le passé, les traces de mouvements de failles sont moins significatives. La méthode destinée à situer dans le temps une marque d'évidence géologique contient un élément de sens commun. Dans le cas de barrages (selon la définition donnée dans le *Bulletin* n° 72 de la CIGB) il est proposé de placer cette marque au début de la période Holocène, car la majeure partie de l'évidence significative est généralement contenue dans cette période.

Mais cela ne signifie pas que l'évidence dans le Quaternaire récent doit être négligée en évaluant la situation tectonique. Au contraire, cette évidence est une indication importante pour une étude complète et détaillée des épisodes tectoniques pendant la période Holocène.

En général, le tracé et la datation des phénomènes tectoniques dans le passé géologique récent sont très souvent un problème difficile qui, d'autre part, doit être défini en termes clairs : faille active ou non active actuellement. Dans chaque cas, toute l'évidence disponible doit être incluse dans l'étude des phénomènes.

1.2.2. Influence de la cinématique de fracturation

Les fractures et ruptures affectant les sites de barrages couvrent un domaine s'étendant des fissures, diaclases et fractures, jusqu'aux failles, systèmes de failles et zones de failles. Selon leur cinématique, les failles peuvent être différenciées comme suit :

- failles normales (de gravité);
- failles avec chevauchement;
- failles avec décrochement.

La cinématique des failles est importante car elle implique la nature et l'étendue des dégâts qui sont à prévoir. Les ruptures les plus nettes et une zone d'écrasement assez limitée sont associées aux failles avec décrochement. On considère que c'est une des raisons pour lesquelles les mouvements de la faille San

b) It has a demonstrated structural relationship to a known capable fault such that movement of the one may cause movement of the other at or near the surface.

This definition is quite conservative, as it should be for nuclear power plants, whose serious damage is virtually unacceptable.

But the situation with dams is different to a certain degree. When subjected to extreme earthquake influences (and surface fault breaking is such an extreme case) it is considered that any amount of damage to the dam in such a situation is acceptable, under proviso that failure of the dam followed by catastrophic flood release is avoided.

Such a mitigating policy is not acceptable in case of the nuclear power plants which must remain of sufficient structural integrity.

This distinction points towards somewhat less stringent criteria. As shown by active tectonics evidence, most significant and decisive traces of recent fault movements pertain to the Holocene Epoch (11 000 years from the present).

Receding further into the past, the relative significance of fault movement traces decreases. Placing a time significance mark at a certain time span from the present, contains an element of common sense approach. In the case of dams (as stated in the definition given in ICOLD *Bulletin* No. 72) it is proposed to place this significance mark at the beginning of the Holocene Epoch because the bulk of significant evidence is usually contained in this Epoch.

But it does not mean that the late Quaternary evidence should be disregarded while assessing the tectonic situation. This evidence is an important pointer for more thorough and detailed study of tectonic episodes during Holocene.

In general, tracing and dating the tectonic phenomena in geologically recent past is in a number of cases a difficult and elusive problem which, on the other hand, must be classified in no uncertain terms : active or not active at present. In each case all the available evidence must be put into the test, as outlined later.

1.2.2. Influence of Fracture Kinematics

Fractures and ruptures affecting the dam sites span the range from cracks, joints and fissures to faults and systems of faults and fault zones. The kinematics of faults differentiate them into the following kinds :

- normal (gravitational) faults
- thrust faults
- strike-slip faults

The kinematics of faulting is important as it implies the nature and extent of damages to be expected. The nearest breaks and rather limited field of crushing influence is associated with strike-slip faults. This is considered to be one of the reasons that large movements of San Andreas fault have been of limited

Andreas ont eu des conséquences limitées pour les barrages situés à proximité de cette faille. Les conséquences sur le flanc soulevé d'une faille avec chevauchement et sur le flanc abaissé d'une faille normale peuvent être beaucoup plus sévères à cause du champ plus étendu de la rupture de surface.

1.2.3. Effets possibles des failles existantes

L'existence de failles dans la région des barrages et des retenues peut avoir les effets suivants :

- activité sismique et séismicité induite avec les effets des secousses sur les ouvrages,
- effets hydrogéologiques, incluant des fuites possibles de la retenue,
- problèmes de stabilité des versants,
- phénomènes de fluage pouvant agir sur les sites de barrages,
- rupture de faille dans la fondation du barrage, pouvant constituer un danger extrême pour la sécurité du barrage.

consequences to nearby dams. Consequences on the upthrown wing of thrust faults or on the downthrown wing of normal faults might be much more severe due to more widespread field of surface fault breaking.

1. 2. 3. Possible Effects of Existing Faults

The existence of faults in the region of dams and storages can have the following effects:

- seismic activity and induced seismic activity with shaking effects on structures.
- hydrogeological effects including possible storage losses
- slope stability problems.
- creep phenomena which can influence dam sites.
- fault breaking in the dam foundations which might be of utmost danger for the dam safety.

2. ÉTUDE DE L'ACTIVITÉ DES FAILLES

2.1. RÉGION À ÉTUDIER

Divers niveaux d'études doivent être appliqués, en fonction de l'étendue de la zone considérée :

- études régionales, couvrant une surface de 150 à 200 km de rayon, en vue d'établir une image de la structure tectonique générale;
- études locales sur une surface de 50 km de rayon, destinées à identifier les failles dont l'influence sera probablement importante sur le site du barrage;
- études des failles traversant le site et ayant une importance particulière pour le barrage.

Des détails concernant l'élaboration des études sont donnés au Chapitre 2.4. décrivant la documentation recommandée sur les phénomènes tectoniques affectant les sites des barrages en question.

2.2. MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES

L'importance des traces évidentes d'activité tectonique appartenant au Quaternaire récent doit être soulignée de nouveau. Il est vrai qu'un grand nombre des structures tectoniques sont l'héritage d'un passé lointain, mais leur importance relative, du point de vue de l'activité contemporaines des failles, devient de moins en moins significative au fur et à mesure que la position chronologique des phénomènes considérés s'éloigne dans le passé géologique. Le début de la période Holocène doit être pris comme un repère significatif, après lequel on peut s'attendre à déceler la plupart des signes évidents de phénomènes tectoniques.

D'autre part, les données contemporaines disponibles (tant historiques qu'enregistrées) constituent un échantillon qui est trop court du point de vue statistique. Les grands événements tectoniques périodiques peuvent se manifester à des intervalles de plusieurs milliers d'années et il est clair que l'évidence historique et enregistrée ne peut pas couvrir l'espace de temps nécessaire. Si les données historiques ou enregistrées impliquent une activité contemporaine de failles, une telle évidence est considérée comme incontestable. Mais pour atteindre une conclusion absolue, les données concernant la capacité des failles en question doivent être vérifiées dans un passé plus lointain.

2.2.1. Détermination du système de failles et de ruptures

Étant donné que l'évaluation du potentiel de rupture d'une faille traversant une fondation de barrage est un des traits les plus complexes et les plus importants dans le projet d'un barrage, les études doivent couvrir le champ complet des informations

2. INVESTIGATION OF FAULTS ACTIVITY

2.1. REGION TO BE INVESTIGATED

Various levels of fault studies should be applied, depending on the area considered :

- regional investigations should cover 150 - 200 km radius, in order to form a picture of the general tectonic setup;
- local investigations in 50 km radius aiming at identifying faults whose influence is likely to be prominent on the dam site;
- investigation of faults intersecting the dam site, having special significance for the dam structure.

Details to which the mentioned investigations should be elaborated are outlined in Chapter 2.4 , describing the recommended documenting of the tectonic features affecting the related dam sites.

2.2. INVESTIGATION METHODOLOGY

The importance of late Quaternary evidence of tectonic activity should be stressed once again. While it is true that a large number of tectonic features is inherited from the distant past, the relative importance of such features from the viewpoint of contemporaneous fault activity becomes less and less significant as the chronological position of considered features recedes into geological past. The beginning of the Holocene Epoch is to be taken as a significance mark after which the bulk of the decisive evidence is expected.

On the other hand the available contemporaneous data (both instrumental and historical) are simply too short a sample for statistical significance. Large recurrent events may be spaced by thousands of years and it is quite clear that the instrumental and historical evidence cannot span the governing time distance. If the findings reached from historical and instrumental data are implicating from the viewpoint of faults activity, such findings are considered decisive. But for the exonerating conclusion, data of faults capability must be checked in more distant past.

2.2.1. Determination of the System of Faults and Ruptures

Since the assessment of breaking potential of a fault crossing the dam foundations is one of the most complex and important features in dam design, the investigations should cover the whole field of geological, seismological, geophysical

et des travaux de reconnaissances géologiques, sismologiques, géophysiques et géodésiques, incluant des tranchées, galeries et forages de reconnaissance suivant les conditions prédominantes.

Le point de départ est la détermination du système de ruptures couvrant la surface affectant le site du barrage. L'étude des cartes et des informations disponibles doit être suivie d'une analyse détaillée stéréoscopique de photos aériennes et/ou de prises de vue photogrammétriques terrestres et d'images satellitaires.

Les méthodes de reconnaissances par télédétection sont d'un intérêt particulier dans cette phase. Trois bandes du spectre électromagnétique total sont utilisées dans la télédétection :

- la lumière visible, y compris les parties ultraviolet et infrarouge, adjacentes aux deux extrémités du spectre visible. Cette partie du spectre peut être photographiée;
- la bande thermique infrarouge;
- la bande des micro-ondes.

La lumière visible est la source principale des données obtenues par télédétection, sous forme de photographies de divers types et applications. Pour l'identification des phénomènes tectoniques, surtout des failles, les photos aériennes à diverses échelles et dans diverses combinaisons d'incidence de lumière et diverses couleurs, jouent un rôle important dans les études tectoniques et dans l'identification et l'observation des failles.

Les deux fenêtres infrarouges fournissent principalement des informations sur les différences thermiques et peuvent être appliquées avec succès aux problèmes hydrogéologiques, mais pas spécialement dans le cas des failles.

La région des micro-ondes est utilisée dans les différentes applications du radar. Les balayages latéraux par radar produisent des ombres accentuées qui aident à souligner les caractéristiques tectoniques. Cette technique est en cours de développement et on s'attend à de futurs progrès dans l'observation des failles.

La technique de la télédétection est un outil inévitable pour les études tectoniques, spécialement lors de la phase préliminaire.

Les travaux cartographiques constituent un support complémentaire dans l'étude des régions et des tracés choisis. Les traces de l'activité possible des failles pendant la période Holocène doivent être vérifiées avec une attention spéciale, car de telles informations sont décisives pour la détermination du potentiel actuel de rupture d'une faille.

2.2.2. Détermination de l'activité néotectonique

Une telle détermination implique tout d'abord une analyse géomorphologique qualitative des photos aériennes et des cartes topographiques. En les analysant, on recherche des indications géomorphologiques de l'activité néotectonique, en enregistrant les signes d'augmentation de l'érosion ou des dépôts, et de différence dans des surfaces comparatives (les terrasses lacustres ou fluviales, les plaines

and geodetic information and field investigations, including trenching, adits and exploratory borings, as might be indicated by prevailing circumstances.

The starting point is determination of the system of ruptures covering the area influencing the dam site. The study of available information and maps should be supported by detailed stereoscopic analysis of air photos and/or terrestrial photogrammetric takes and satellite imagery.

Remote sensing investigation methods are of particular interest at this stage. Three sections of the full electromagnetic spectrum are utilized in remote sensing :

- the visible light including the ultraviolet part and infrared part adjacent to both ends of the visible spectrum. This part of the spectrum can be photographed;
- the thermal infrared sector;
- the microwaves sector.

The visible light is the main source of remote sensing data consisting of photographs of many different kinds and applications. For identifying of tectonic features, especially faults, aerial photographing in different scales and in different combinations of light incidence and colors, has the primary role in tectonic studies and in faults identifying and monitoring.

The two infrared windows mainly furnish information on thermal differences and are of useful application for hydrogeological surveying, but not specifically on fault features.

The microwave region is used for different radar applications. Side radar scanning produces accentuated shadows which help in underlining the tectonic features. The technique is under development and further advances in fault observations are expected.

The remote sensing data in their totality are an unavoidable tool in tectonic studies, especially in the preliminary stage.

Actual field mapping should support further the investigation of selected areas and lineaments. Special care should be exerted in checking the traces of possible Holocene activity of faults, as such information is a decisive one for determination of present days breaking potentials of faults.

2.2.2. Determination of Neotectonic Activity

Such determination implies first the qualitative geomorphologic analysis of air photos and topographic maps. In their scrutiny, geomorphologic indications of neotectonic activity are searched for, registering signs of increased erosion or accumulation and of discrepancy in comparative surfaces (river and lake terraces , fluvial plains etc) . The above described studies are to be followed by quantitative

fluviales, etc.). Les études mentionnées ci-dessus doivent être suivies d'analyses quantitatives des cartes topographiques : préparation de modèles linéaires et/ou plans des formes de surface, développés en considérant une inactivité tectonique complète, avec corrélation avec les formes de surface actuelles.

2.2.3. Détermination de l'activité tectonique récente

Elle comprend l'analyse des relations chronologiques entre le système de ruptures et les unités géologiques affectées par ces ruptures. La méthode d'analyse de population des failles, appartenant à la surface considérée, est utile pour établir l'image chronologique de l'activité tectonique récente. Une importance particulière est liée aux perturbations des formes en surface, appartenant à la période Holocène, incluant les traces de rupture en surface des failles, forme la plus nette de phénomènes tectoniques. D'autres manifestations de l'activité tectonique récente et contemporaine sont le fluage le long des failles et les mouvements lents verticaux et horizontaux de certaines régions. En règle générale, de tels mouvements n'engendrent pas de problèmes pour les barrages. Toutefois, dans des zones contiguës et dans des conditions particulières, les barrages peuvent être endommagés.

Outre les études structurales, stratigraphiques et géomorphologiques décrites auparavant, la géochronologie isotopique est une autre technique pour déterminer la position chronologique des événements tectoniques étudiés. L'utilisation de différentes méthodes renforce les conclusions au moyen de recoupements.

2.2.4. Détermination de l'activité contemporaine des failles

Avec les études de l'activité tectonique récente mentionnées ci-dessus, les évidences historique et enregistrée complètent les informations sur le danger de rupture de failles à travers la fondation du barrage.

En premier lieu, il est nécessaire d'effectuer des études sismologiques en s'appuyant sur des données disponibles. Une phase importante est l'installation de stations sismologiques. Étant donné que l'installation d'appareils d'auscultation sismique (tant pour les fortes secousses que pour la sismicité induite) est de plus en plus répandue (rendue obligatoire par des règlements dans plusieurs pays), une telle installation est également un outil très important pour l'observation de l'activité actuelle des failles. Si des événements de faible magnitude s'alignent le long de la trace d'une faille existante, c'est une indication très forte de l'activité présente de la faille en question.

Dans le Chapitre 9 donnant des exemples, le cas du barrage Mratinje est décrit et discuté; il montre l'évidence d'une activité précédant le remplissage de la retenue, le long d'un accident linéaire marquant qui a développé une forte sismicité induite pendant l'exploitation ultérieure de la retenue.

Par conséquent, l'installation de stations sismologiques (deux ans au minimum avant le remplissage d'une retenue) est fortement recommandée, au moins pour les barrages importants et dans les régions ayant une activité sismique.

Les observations géodésiques et les analyses de mesures périodiques de triangulation et de nivellement (en utilisant un intervalle de temps approprié)

analysis of topographic maps : preparation of linear and/or planar theoretical models of surface forms developed under conditions of absolute tectonic quietness and correlation of actual surface forms with the theoretical model.

2.2.3. Determination of Recent Tectonic Activity

It comprises the analysis of chronological relations between the system of ruptures and geological units disturbed by the mentioned ruptures. The method of fault population analysis, pertaining to the considered area, is helpful in forming a chronological picture of recent tectonic activity. And especially important, the disturbances in the surface forms pertaining to the Holocene Epoch. It implies the traces of surface fault breaking, as the most violent form of tectonic phenomena. Further manifestations of recent and contemporaneous tectonic activity is the creep along the fault lines and slow vertical and horizontal movements of certain regions and areas. Such movements usually do not imply problems for dam structures. Still, in bordering zones and under special conditions, damages to dam structures are possible.

Apart from the structural, stratigraphic and geomorphologic superposition described above, isotopic geochronology is still another technique of determining the chronological position of investigated tectonic events. Use of several methods strengthens the related conclusions by cross-checking.

2.2.4. Determination of Contemporaneous Activity of Faults

Together with the previously mentioned investigations of recent tectonic activity, historical and instrumental evidence complete the information body on the threat of fault breaks in the dam foundation.

It is first necessary to perform seismological analyses using the available data. An important step is setting up of seismological stations. Since the installation of dam monitoring instruments (both on strong motion and induced seismicity levels) becomes more and more widespread (obligatory by regulations in many countries) this is also an important tool in monitoring the actual activity of faults. When low magnitude events show linear arrangement along the trace of some existing fault, this is a very strong indication of the present activity of such a fault.

In the Chapter 9 of Case Histories, the Mratinje Dam case is described and discussed, showing evidence of preimpounding activity along a prominent linear feature, which developed quite strong induced seismicity during subsequent storage operation.

Therefore placing of seismological stations (min. two years before impounding) is strongly recommended ,at least for important dams and in seismically active regions.

Geodetic studies and analyses of retriangulations and releveing (using the available time span) are another tool which can indicate contemporaneous crustal

constituent un autre moyen de déceler la mobilité de la croûte terrestre dans une région plus vaste avoisinant le barrage. En se basant sur les résultats des mesures géodésiques effectuées pendant la construction du barrage, on peut chercher les composantes des déplacements verticaux et horizontaux à partir de mesures exécutées à des intervalles suffisamment longs. Dans le cas du barrage Bajina Basta, en Yougoslavie (décrit dans le Chapitre 9), de telles mesures périodiques étaient tout à fait significatives et complétaient l'image de l'activité tectonique actuelle dans cette région.

L'utilisation du système GPS (Global Positioning System – Triangulation par satellites) est un autre moyen puissant de détecter la mobilité de régions de la croûte terrestre (ce procédé a été appliqué récemment dans la région du barrage Bajina Basta).

L'observation géologique du réseau de failles au site d'un barrage et dans ses environs est l'opération fondamentale et réellement la plus importante pour évaluer le potentiel de rupture en surface le long des traces caractéristiques des failles affectant le site d'un barrage. L'observation des perturbations (ou de leur absence) survenues pendant le Quaternaire récent, et spécialement durant la période Holocène, peut fournir les informations les plus pertinentes sur l'activité tectonique dans le passé récent et sur le potentiel de rupture des failles considérées.

L'absence ou la présence de ruptures de failles pendant la période Holocène (pour les failles considérées dont l'activité actuelle n'est pas encore confirmée) est le meilleur moyen de discerner si une faille traversant le site du barrage doit être considérée comme active ou non.

Les dislocations tectoniques qui sont actives et récentes (précisément, la configuration qui est de première importance pour les barrages, étant donné que des ruptures de failles identiques peuvent se produire dans un proche avenir) laissent des traces caractéristiques en surface qui, si elles ne sont pas effacées, constituent l'évidence principale de l'activité tectonique en question. Cette activité laisse des traces dans la morphologie de surface, telles que :

- des escarpements et gradins le long de la ligne de faille, pouvant être associés avec des fractures et glissements secondaires. Quand des dépôts récents sont intersectés et remaniés, ces constatations sont souvent concluantes.
- des dislocations et décalages de lits de cours d'eau et de crêtes.
- des changements des profils en long de rivières.
- des dépressions fermées, qui constituent souvent l'évidence décisive, si elles ne sont pas associées à des phénomènes karstiques.
- des changements des conditions hydrogéologiques le long de la faille, dus à des mouvements récents.
- des déformations d'ouvrages d'art, en particulier de routes, tunnels et ouvrages linéaires en général. De telles constatations sont à considérer comme des marques réellement évidentes.

Lorsque de telles indications géologiques et géomorphologiques existent, les mesures sismiques et géodésiques de l'activité actuelle deviennent très importantes, car de cette manière le potentiel de l'activité se trouve clarifié et fondé sur des documents.

mobility in wider dam region. To base the findings on measurements started during dam construction, analysis of geodetic measurements performed at longer intervals is needed, searching for horizontal and vertical components of displacements. In the case of Bajina Basta Dam in Yugoslavia (later described as a case history) such repeated measurements were quite significant, completing the picture of present tectonic activity in this region.

Using the GPS system (for larger networks linked to orbiting satellites) is another powerful means of monitoring the crustal mobility (applied recently in the mentioned Bajina Basta Dam region).

Geological observation of the faults network at the dam and its wider surroundings is the basic and factually most important action in assessing the faulting capability of lineaments affecting the dam site. Observation of disturbances (or their absence) in late Quaternary and especially in the Holocene Epoch features can provide the most pertinent information on tectonic activity in the recent past and on breaking capability of the considered faults.

The absence or presence of fault breaking during the Holocene Epoch (for faults singled out but without confirmation of present activity) is considered to be the most powerful test in discerning whether a fault intersecting the dam site should be considered active, or not.

Tectonic dislocations which are active and recent (just the combination which is of prime importance for the dams, as similar fault breaks may then be expected in near future) leave traces in the form of surface features which, if unobliterated, constitute the main evidence for the related tectonic activity. This activity leaves traces on surface morphology, such as :

- scarps and steps along the fault line, possibly associated with secondary fracturing and landsliding. When recent depositions are intersected, such findings are often conclusive;
- dislocations of stream beds, offset streams and ridges;
- changes in the longitudinal profiles of rivers;
- closed depressions which constitute often the conclusive evidence, if not linked with karstic features;
- changes in hydrogeological conditions along the fault line due to recent movements;
- distortions in man made structures, especially roads, tunnels and linear features in general. Such findings are to be considered positive evidence.

When such geomorphologic and geological indications are present, instrumental seismic and geodetic observation of current activity are of great importance as in such a way the activity potential might be clarified and documented.

L'application des observations GPS concernant de larges zones de rupture est un moyen puissant pour la quantification des mouvements contemporains de blocs délimités par des failles. De telles observations ont été mises en œuvre sur certains barrages suisses [23]*, et aussi dans la région du barrage Bajina Basta (comme signalé dans le Chapitre 9) et seront probablement appliquées de plus en plus dans le futur.

Les observations hydrogéologiques et hydrochimiques sont aussi nécessaires pour compléter l'image au moyen d'indications (ou leur absence) sur les conséquences d'une activité tectonique récente.

En présence de phénomènes qui peuvent être raisonnablement considérés comme actifs du point de vue tectonique, les reconnaissances géophysiques (sismique-réflexion et sismique-réfraction, de profondeur limitée) sont indiquées.

Lorsque les fondations d'un barrage comportent une couverture de terrain et que l'observation directe n'est pas ainsi possible (et lorsqu'il y a des indications qu'une ligne de faille peut passer par la fondation en produisant des dégâts avec réduction correspondante de la qualité mécanique de la roche le long de la trace de la faille et dans sa zone), la sismique-réflexion et la sismique-réfraction doivent alors être essayées pour détecter l'existence de la zone affectée le long de la ligne de faille et déterminer sa géométrie (direction et pendage). Ces données doivent être associées aux traces de la faille « capable » qui est l'objet des reconnaissances. En effet, une faille avec un potentiel de destruction doit être relativement longue, sans quoi elle ne peut pas se présenter comme une faille active. De toute façon, les reconnaissances géophysiques mentionnées ne permettent pas de prouver de façon décisive l'existence d'une faille potentiellement active. Une fois que l'emplacement d'une telle faille est déterminé, des forages de reconnaissance sont nécessaires pour mettre en évidence la faille active potentielle. Il faut se rappeler qu'une faille active ne peut pas être une petite dislocation et que les perturbations associées et la chute des propriétés mécaniques de la roche adjacente doivent être détectables. À ce propos, les failles avec décrochement peuvent être moins détectables.

Enfin, des tranchées, galeries et forages de reconnaissance sont nécessaires pour fournir des détails sur l'activité présente ou récente des failles. En particulier, des tranchées sur les traces de failles et la datation géochronologique des matériaux rencontrés peuvent fournir des données valables sur les ruptures périodiques des failles et leur séquence dans le temps.

On doit noter que si la faille considérée était active pendant le Quaternaire récent / Holocène, il est très probable que certaines traces des mouvements tectoniques restent le long de la ligne de faille (en notant aussi que de tels mouvements sont généralement périodiques), fournissant ainsi une base de discrimination dans l'évaluation de l'activité des failles.

L'étude des conditions mentionnées et des données obtenues sur le terrain permet de comprendre les événements d'origine sismique survenus dans un passé géologique récent et de déduire ce qui est susceptible de se produire dans un proche avenir (couvrant la durée de vie du barrage en question).

(*) Les chiffres entre crochets renvoient à la liste des références (Chapitre 10).

Application of GPS observations concerning larger ruptured zones is quite powerful in quantifying the contemporaneous movements of blocks delineated by faults. Such observations were applied on some Swiss dams [23] (*) (also in the Bajina Basta Dam region, as reported in the Chapter 9 on Case Histories) and shall probably be applied in future with increasing frequency.

Hydrogeological and hydrochemical observations are also needed to complete the picture with indications (or their absence) of consequences of recent tectonic activity.

For features which can reasonably be supposed to be active tectonically, geophysical investigations (shallow reflective and refractive seismics) are indicated.

When the dam foundations are covered so that direct observation is not possible (and there are indications that a fault line might intersect the foundation introducing also damages and corresponding decrease of the mechanical quality of rock along the fault trace and within its zone), then reflective/refractive seismics should be tried to detect the consequences of the disturbed zone along the fault line and to establish its geometry (strike and dip). Such data should then be linked with surface traces of the capable fault which is being searched for. Namely, a fault with damaging potential has to display a corresponding, relatively large length, otherwise it cannot be a candidate for an active fault. Anyhow, the mentioned geophysical investigation should not be considered as a decisive proof of the existence of potentially active fault. Once the location of such a fault is indicated, exploratory boreholes are needed to bring forth direct evidence of the potential active fault in question. It should be kept in mind that an active fault cannot be a small disturbance and that accompanying disturbances and changes in mechanical properties of the surrounding rock should be detectable. Strike-slip faults might be less detectable in this respect.

Finally, trenches, adits and exploratory borings are needed to clarify details on present or recent activity. Especially trenching over fault traces and geochronological dating of encountered materials is known to furnish valuable data on recurring fault breaks and their time sequence.

It should be kept in mind that if the considered fault was active during late Quaternary/Holocene , it is very probable that some trace of such tectonic movements should be left along its line (noting also that such movements are usually recurring) thus supplying a basis for discrimination in assessing the faults activity.

Studying the mentioned conditions and field data, makes it possible to understand what happened during earthquakes in recent geological past and this information is the best guide to inferring what is to be expected in the near future (covering the lifetime of the dam in question).

(*) *Numbers between brackets refer to the list of references (Chapter 10).*

La preuve du potentiel de rupture d'une faille est un facteur limitatif absolu pour le site du barrage considéré. C'est une situation qui doit être résolue suivant le principe du « oui ou non ». Ou le barrage est estimé se trouver sur une faille active (et alors c'est l'abandon du site ou le choix prudent d'un barrage en remblai), ou la faille n'est pas considérée comme active et alors c'est un projet normal de barrage.

2.2.5. Documentation sur l'activité tectonique des failles

Les résultats de l'étude relative à l'activité contemporaine des failles traversant les sites de barrages doivent être documentés dans le cadre suivant :

L'emplacement du barrage et de la retenue en question est tout d'abord à définir par rapport au réseau régional des fractures, sur des cartes topographiques à des échelles appropriées, comprenant :

- cartes avec tracés des ruptures, à l'échelle 1 : 100 000 jusqu'à 1 : 200 000;
- cartes des épicentres de séismes connus avec leurs magnitudes (intensités) et avec les profondeurs des hypocentres, à l'échelle 1 : 500 000 jusqu'à 1 : 1 000 000;
- cartes séismologiques des accélérations sismiques prévues pour les périodes de retour choisies, à l'échelle 1 : 500 000 jusqu'à 1 : 1 000 000. Dans la phase initiale des études, des données régionales existantes seront utilisées;
- cartes néotectoniques montrant les blocs avec mouvements différentiels et les failles les délimitant, et indiquant aussi les signes des mouvements, à l'échelle 1 : 100 000 jusqu'à 1 : 200 000.

Des informations plus détaillées concernant la zone de la retenue comprennent les documents suivants :

- cartes détaillées du réseau de ruptures, à l'échelle de 1 : 25 000 jusqu'à 1 : 50 000;
- cartes des épicentres avec informations relatives aux séismes : magnitudes (intensités) et profondeurs des hypocentres, à l'échelle 1 : 100 000 jusqu'à 1 : 200 000;
- cartes séismologiques des accélérations sismiques prévues pour les périodes de retour choisies, à l'échelle 1 : 100 000 jusqu'à 1 : 200 000;
- cartes néotectoniques montrant les blocs avec mouvements différentiels et les failles les délimitant, et indiquant les signes et les intensités relatives des mouvements, à l'échelle 1 : 100 000 jusqu'à 1 : 200 000;
- cartes des glissements actifs ou potentiels, à l'échelle 1 : 25 000 jusqu'à 1 : 50 000.

La documentation concernant le site du barrage comprend :

- cartes du réseau détaillé des ruptures à l'échelle 1 : 5 000 jusqu'à 1 : 10 000. Les ruptures seront classées suivant leur longueur, leur cinématique et la chronologie des activités;
- cartes des épicentres des séismes survenus dans le passé, avec leurs magnitudes (intensités) et les profondeurs des hypocentres, à l'échelle 1 : 25 000 jusqu'à 1 : 50 000.

The positive evaluation of the fault breaking potential is an absolute limiting factor for the dam site in question. This is a situation which must be resolved following the “ yes or no ” principle. Either a dam is evaluated to be on an active fault and then it means abandoning the site or placing a conservative embankment dam, or it is evaluated not to be located over such a fault and then it is a normal dam design.

2.2.5. Documenting the Tectonic Activity of Faults

The results of studying the possibility of present tectonic activity of faults crossing the dam sites, should be documented within the following frame:

The position of the dam and storage in question should be first shown within the regional ruptures pattern, on corresponding large scale maps, including:

- map of rupturing lineaments in 1 : 100 000 to 1 : 200 000 scale;
- epicentral map of known earthquakes with their magnitudes (resp. intensities) and with depths of hypocenters, in scale 1 : 500 000 to 1 : 1 000 000;
- seismological map showing the expected accelerations for the selected return periods in scale 1 : 500 000 to 1 : 1 000 000. At the initial stage of studies existing regional data should be used;
- neotectonic map showing blocks with differential movements and their bordering faults, indicating the sign of movements, in scale 1 : 100 000 to 1 : 200 000.

More detailed information concerning the storage area, including :

- detailed maps of rupturing pattern in scale 1 : 25 000 to 1 : 50 000;
- epicentral maps with related information on earthquakes: magnitudes (resp. intensities) and hypocentral depths in scales 1 : 100 000 to 1 : 200 000;
- seismological maps with expected earthquake accelerations for the selected return periods in scales 1 : 100 000 to 1 : 200 000;
- neotectonic map showing blocks with differential movements and their bordering faults, indicating the sign and relative intensity of movements, in scale 1 : 100 000 to 1 : 200 000;
- map of active and potential landslides in scale 1 : 25 000 to 1 : 50 000.

The dam site documentation including :

- map of the detailed rupturing pattern in scale 1 : 5 000 to 1 : 10 000. The ruptures on the map should be classed according to their length resp. importance, kinematics and chronology of activity;
- epicentral maps of past earthquakes with their magnitudes (resp. intensities) and hypocentral depths in scale 1 : 25 000 to 1 : 50 000;

- cartes séismologiques des accélérations prévues pour les périodes de retour choisies, à l'échelle 1 : 25 000 jusqu'à 1 : 50 000.
- cartes néotectoniques montrant les blocs avec mouvements différentiels, avec les signes et les lignes d'égale intensité (vitesse) de mouvement, à l'échelle 1 : 25 000 jusqu'à 1 : 50 000.
- cartes des glissements actifs ou potentiels sur les versants, classés suivant leur genèse, à l'échelle 1 : 5 000 jusqu'à 1 : 10 000.

La documentation mentionnée doit être, dans chaque cas, adaptée aux conditions particulières prédominant sur les sites des barrages et des retenues en question, à leurs dimensions, à l'importance et au degré de l'activité tectonique observée.

Pendant la phase des études préliminaires, les informations générales sur la région en question seront recueillies et évaluées de manière critique, en indiquant les phénomènes qui devront être étudiés plus à fond pendant l'étude de faisabilité.

L'étude de faisabilité d'un grand barrage nécessite un éclaircissement complet des phénomènes tectoniques affectant le site du barrage et des risques possibles dus aux failles actives. L'étendue des reconnaissances concerne surtout cette phase des études, car pendant l'étude de faisabilité les décisions fondamentales concernant le projet de barrage en question doivent être prises.

Pendant la préparation du projet d'exécution, les conclusions admises sur l'activité tectonique intéressant le site du barrage sont à réexaminer pour approbation finale, en général dans le cadre et suivant les détails qui ont été appliqués pendant la préparation de l'étude de faisabilité.

- seismological map with expected accelerations for the selected return period in scale 1 : 25 000 to 1 : 50 000;
- neotectonic maps showing blocks with differential movements, represented by isolines of the sign and intensity (resp. velocity) of movement, in scale 1 : 25 000 to 1 : 50 000;
- map of active and potential slope slides classified genetically, in scale 1 : 5 000 to 1 : 10 000.

The mentioned documentation should in each case be adapted to particular circumstances prevailing at the dams and storages in question, to their size, importance and degree of observed tectonic activity.

During the prefeasibility stage of studies the general information on the region in question should be collected and critically assessed, indicating features which shall be investigated during the Feasibility Studies.

The Feasibility Study of a large dam needs full clarification of the tectonic features influencing the dam site and of possible risks due to active faults. The outlined scope of investigations concerns mainly this stage of studies as during the Feasibility Study basic decisions on the design of the dam in question, are to be taken.

During the preparation of the Final Design, the accepted findings on the tectonic activity of interest to the dam site should be considered again for final approval, generally within the scope and details as developed during the preparation of the Feasibility Study.

3. PRÉVISION DES MOUVEMENTS FUTURS DE FAILLES

3.1. DATATION DES MOUVEMENTS DE FAILLES SURVENUS DANS LE PASSÉ

La datation du mouvement le plus récent d'une faille revêt une importance décisive lors de l'étude du projet d'un barrage dont la fondation est traversée par cette faille. S'il ressort que la faille en question est toujours active, il s'ensuit des conséquences lourdes pour le projet du barrage.

Par conséquent, la détermination de l'âge du mouvement le plus récent de la faille en question doit être entreprise en utilisant toutes les techniques disponibles. Les superpositions stratigraphiques et structurales, ainsi que les études géomorphologiques, sont d'un grand intérêt.

Si l'on trouve que les couches appartenant à la période Holocène présentent des perturbations, cela constitue une évidence décisive. Si de telles couches perturbées sont d'âge Quaternaire indéterminé, une datation géochronologique isotopique plus exacte sera alors essayée.

La datation isotopique des sédiments du Quaternaire est d'un intérêt particulier à plusieurs points de vue et un certain nombre de techniques sont développées à ce propos. [19].

La méthode isotopique la plus ancienne, qui est recommandée pour les couches du Quaternaire les plus jeunes, est liée à la présence du Carbone Radioactif Cosmogène (méthode du C^{14}). La plupart des informations sur l'âge des strates du Quaternaire sont obtenues par cette méthode. Pour l'appliquer, il faut trouver dans les couches du Quaternaire une substance organique, (par exemple, du bois ou de la tourbe). La décomposition radioactive de l'isotope C^{14} peut fournir des informations sur l'âge des échantillons, entre 700 et 70 000 ans à partir du temps présent. C'est amplement suffisant pour la datation des couches jeunes du Quaternaire et spécialement de la période Holocène.

Quelques autres isotopes radioactifs (Uranium/Thorium, Plomb₂₁₀, Chlore₃₆) couvrent aussi en partie la période Holocène.

Outre les isotopes radioactifs, certaines substances subissent des changements dans le temps, comme c'est le cas de certaines propriétés des aminoacides (qui se trouvent le plus souvent dans les os) ou de l'hydratation des obsidiennes, le temps étant compté à partir de la formation des couches Quaternaires en question.

Une autre méthode capable de couvrir la partie critique récente du Quaternaire consiste à dater les échantillons à partir des détériorations causées par la radiation à laquelle les échantillons étaient exposés. Suivant la méthode appliquée pour étudier le degré de détérioration subie, la méthode de Luminescence Thermique et la méthode d'Electron-Spin-Résonance couvrent de manière identique l'espace de temps de 100 à 10⁶ ans à partir du temps présent.

Une méthode physico-stratigraphique basée sur la datation paléomagnétique (i.e. sur les traces laissées dans les échantillons par l'inversion de pôle magnétique)

3. PREDICTABILITY OF FUTURE FAULT MOVEMENTS

3.1. AGE DATING OF THE PAST FAULT MOVEMENTS

Dating of the most recent movement on a given fault is of decisive importance while contemplating the design of a dam whose foundations are intersected by this fault. If the consideration that the fault in question is mobile at the present time prevails, heavy consequences for the dam design are to follow.

The age determination of the most recent movements of the fault in question should be therefore attempted by all available techniques. Structural and stratigraphic superposition and also geomorphic studies, are of interest.

If it is found that the Holocene strata are disturbed by fault movements, this constitutes a decisive evidence. If such disturbed strata are of undefined Quaternary age, then closer geochronological isotopic dating should be attempted.

The isotopic dating of Quaternary sediments is of particular interest from several viewpoints and a number of techniques is developed in that respect [19].

The oldest isotopic method, which is indicated for the youngest Quaternary strata is linked to the presence of the Cosmogene Radioactive Carbon (" ^{14}C method "). Most of information on dating the Quaternary strata is obtained by its application. In order to apply it, organic substance like wood or turf should be found in the Quaternary strata. The radioactive decomposition of the ^{14}C isotope furnishes information on the age of samples between 700 and 70 000 years from present. This is sufficient for dating the early Quaternary strata, aiming to check specifically the Holocene time span.

A few other radio isotopes (Uranium/Thorium, Lead₂₁₀, Chlorine₃₆) also cover partly the Holocene period.

Apart from radioactive isotopes, there are certain substances exhibiting time depending changes, like some properties of aminoacids found mainly in bones or the hydration of obsidians, time being counted from the formation of the Quaternary strata in question.

Another method able to cover the critical early part of the Quaternary, consists in dating the age of samples on the basis of damages caused by ambiental radiations to which the samples were exposed. Depending on the method applied to study the degree of damages, Thermal Luminiscence Method and Electron-Spin-Resonance Method are covering similarly the span of 100 years to 10^6 years from now.

A physical-stratigraphic method based on paleomagnetic dating i.e. on traces left in the samples material by magnetic pole inversions, can also be useful in

peut être également utile pour la détection des mouvements dans le Quaternaire, en indiquant si l'échantillon est plus vieux ou plus jeune que 700 000 ans.

La meilleure chance que l'on peut avoir en datant les mouvements récents de faille se présente lorsque la faille est recouverte de matériaux du Quaternaire. On peut alors dater ces matériaux en appliquant le plus grand nombre possible des méthodes mentionnées ci-dessus, et vérifier s'il est possible d'exclure ou non la période Holocène. Le recouplement des résultats obtenus par diverses méthodes augmentera considérablement la fiabilité de l'évaluation.

3.2. ÉVIDENCE HISTORIQUE

Les informations sur l'évidence historique de l'activité des failles sont aussi d'une grande importance. De telles informations seront contenues dans des documents historiques fiables. Le problème est que les rapports sur les dommages aux villes et aux structures sont beaucoup plus fréquents que les rapports sur les mouvements des failles. Mais si un tel document historique fiable est disponible, l'activité de la faille en question est fortement corroborée.

3.3. POSSIBILITÉ DE PRÉVISION DES MOUVEMENTS DE FAILLES

Le problème de la prévision de mouvement d'une faille n'est pas résolu actuellement.

Quand une faille coupe le site d'un barrage et possède un potentiel macrosismique suffisant (longueur et magnitude estimée), et que les études et les reconnaissances concernant la datation du dernier mouvement de la faille sont achevées, il est nécessaire de conclure si la faille est actuellement active ou non. Si la datation met en évidence que la faille était active au cours de la période Holocène, il est prévisible qu'elle peut bouger de nouveau pendant la vie du barrage. Les études ultérieures et la conclusion finale concernant la faisabilité du barrage devront tenir compte d'une telle prévision.

Mais actuellement, la prévision et la datation, même approximative, du séisme futur sont encore hors de portée. La faille la mieux étudiée entre toutes, San Andreas en Californie, s'est montrée d'une nature bien évasive à cet égard. Aussi, vaut-il mieux reléguer cette question à des considérations futures. Par contre, la prévision basée sur des méthodes statistiques, avec estimation des probabilités, reste un outil important pour l'évaluation du risque sismique.

3.4. DÉTECTION DE FAILLES ACTIVES À PARTIR DE LA SÉISMICITÉ INDUITE

La séismicité induite existe dans quelques cas de retenues. Si elle est présente et observée au moyen d'appareils de mesure, elle est généralement un bon détecteur de phénomènes actifs. Étant donné que les réseaux de mesure de faibles magnitudes sont de plus en plus appliqués aux grands barrages, cette information (spécialement lorsque les observations sont faites aussi avant la mise en eau de la retenue) peut être très utile pour la formulation de conclusions sur l'activité tectonique contemporaine des failles traversant un site de barrage.

detecting Quaternary movements, indicating that the sample is younger or older than 700 000 years.

The best chance that can be expected while dating the latest fault movements is if the fault line is covered by Quaternary material. Then there is a chance to date the age of this material applying as much of the above mentioned dating methods as possible and to check whether the Holocene period is excluded or not. Cross-checking of data would considerably increase the validity of the estimate.

3.2. HISTORIC EVIDENCE

Information on historic evidence of the related fault activity is also of primary importance. Such information should be reported in credible historical documents. The problem is that reports on damages to towns and structures are much more frequent than reports on fault movements. But when such a credible historical document is at hand, the activity of the fault in question is very strongly supported.

3.3. POSSIBILITY OF PREDICTING FAULT MOVEMENTS

The problem of actually predicting the fault movement at present is not solved.

Given the existence of a fault at a dam site, with sufficient macroseismic potential (length and estimated magnitude) and having completed studies and investigations concerning the dating of the last fault movement, it is inevitable to make a conclusion whether the fault is active at present or not. If sufficient dating evidence is gathered that the fault was active during the Holocene Epoch, the prediction is that it can move again during the lifetime of the dam. Further studies and final conclusion on the dam feasibility should be reached in accordance with such prediction.

But actually predicting and even approximately dating the future earthquake is not yet within reach. The best studied fault of all (San Andreas, California) has been quite elusive in this respect. So this question is best left for future considerations. On the other hand, predicting on the basis of statistical methods, evaluating probabilities, remains an important tool in assessing the seismic hazard.

3.4. TRIGGERED SEISMICITY AS DETECTOR OF ACTIVE FEATURES

Triggered (or induced) seismicity is present in some storage cases. When present and instrumentally monitored, it is usually a good detector of active features. Since low magnitudes monitoring networks are becoming more and more applied for large dams, such information (especially when covering also the preimpounding observation phase) can yield very useful results and can help considerably in formulating conclusions concerning the activity of dam site faults.

4. EFFETS EN SURFACE DES MOUVEMENTS DE FAILLES

4.1. DÉTAILS DES RUPTURES DE FAILLES

Des détails sur les ruptures de failles et les mouvements de fluage associés sont d'un intérêt particulier pour les sites de barrages.

Dans la littérature sur cette question [3], il est mentionné que pendant les 150 dernières années on a noté jusqu'à 200 cas de ruptures de failles. Probablement, beaucoup plus de cas de ruptures n'ont pas été rapportés pendant cette période.

Toutes les ruptures de failles connues se sont produites pour ainsi dire sur des failles préexistantes et il est probable que, dans la plupart des cas, de telles failles peuvent être reconnues comme actives. Il est possible que sur certaines failles les traces de mouvements précédents ont été effacées et qu'il est objectivement difficile de découvrir l'activité précédente. Mais pour les failles qui ont été réactivées pendant la période Holocène, il est raisonnable de s'attendre à ce qu'une reconnaissance plus approfondie (en particulier par tranchées) puisse révéler des traces de mouvements (relativement) récents.

La possibilité qu'une nouvelle faille se forme sur le site d'un barrage n'est pas prise en considération, en dépit du fait que chaque faille a commencé par être une nouvelle faille. En pratique, la possibilité de formation d'une nouvelle faille sur le site d'un barrage est complètement écartée, comme étant totalement improbable.

Un fait établi (se référant à l'évidence des ruptures de failles) est que les ruptures sont en général des phénomènes périodiques. Une certaine évidence historique sur la fréquence des ruptures de failles existe. Mais, presque toute cette évidence résulte de la datation des mouvements périodiques de failles qui étaient actives au cours du Quaternaire récent et de la période Holocène.

Des ruptures de failles peuvent se répéter à des intervalles de plusieurs milliers d'années. Ce fait explique pourquoi l'évidence historique des ruptures de failles est si rare.

Il faut aussi noter que des glissements de terrain accompagnent souvent des ruptures de failles et ce fait doit être pris en considération en interprétant l'évidence.

4.2. CINÉMATIQUE DES RUPTURES DE FAILLES

La cinématique des ruptures de failles est importante car elle indique la nature des dégâts susceptibles de se produire sur le barrage et ses ouvrages annexes. À son tour, ce problème est lié au type de rupture :

– si la faille en question est du type avec décrochement (par exemple, la faille San Andreas en Californie), on peut s'attendre à une rupture nette, sans trop de

4. SURFACE EFFECTS OF FAULT MOVEMENTS

4.1. DETAILS OF FAULT BREAKS

Details of fault breaks and associated creep movements are of particular interest for dam sites.

It is stated in literature on this question [3] that up to 200 fault break cases were noted during the past 150 years. Probably much more fault break cases went unnoticed during this period.

Virtually all known fault breaks happen on preexisting faults and it is probable that in most cases such faults can be recognized as active. It is possible that on some faults the traces of preceding movements were obliterated and it is objectively difficult to discover the previous activity. But for the faults which were activated during the Holocene Epoch it is quite reasonable to expect that closer scrutiny (especially by trenching) can reveal traces of (relatively) recent movements.

The possibility that a new fault can break at a dam site is not being taken in consideration, in spite of the fact that each fault was a new one, to begin with. In practice such a possibility is completely disregarded as utterly improbable.

It is an established fact (using fault breaks evidence) that faulting is generally a recurrent phenomenon. There is some historical evidence on faults breaking frequency. But most of such evidence is obtained by dating the recurrent movements on faults active during the late Quaternary and Holocene Epoch.

Faults breaks can be renewed at intervals comprising thousands of years. This fact explains why so many active faults have very scarce historical evidence of breaking.

It is also to be noted that landslides in many cases accompany the fault breaks, and this has to be taken in consideration while interpreting the evidence.

4.2. KINEMATICS OF FAULT BREAKS

The kinematics of fault breaks is also important as it indicates the nature of damages that can be expected on the dam structure and its appurtenances. This in turn is related to the type of faulting:

– if the fault in question is of strike-slip type (e.g. San Andreas fault in California) we might expect neat breaks without much lateral damage. This is

dommages latéraux. Cela est corroboré par le comportement des barrages situés à proximité de la faille (barrages San Andreas et Crystal Springs);

– les failles avec chevauchement, comme dans les séismes d'Alaska et du Chili, présentent généralement des déformations complexes sur le bloc en chevauchement, ce qui est défavorable pour les barrages;

– dans le cas d'une faille normale, une situation défavorable identique se développe sur le bloc abaissé, qui est en outre exposé à une extension de la croûte terrestre, ce qui est particulièrement défavorable.

supported by the behavior of dams located practically adjacent to San Andreas fault (e.g. San Andreas and Crystal Springs Dams);

- thrust faults like in the Alaskan and Chilean earthquakes have usually complex distortions on the upthrown block and this is unfavorable for dams;

- in case of normal faulting similar unfavorable situation develops on the downthrown block which is moreover exposed to crustal extension, this being an especially unfavorable feature.

5. ÉVALUATION DES EFFETS DES MOUVEMENTS DE LA CROÛTE TERRESTRE SUR LES BARRAGES

Les mouvements de la croûte terrestre incluent tous les mouvements s'y manifestant, comprenant les mouvements isostatiques, les mouvements des failles et les déformations de la croûte terrestre, qui s'étendent des mouvements de fluage se produisant aux limites des divers blocs de la croûte jusqu'à des mouvements plus complexes, avec composantes horizontales et verticales, conduisant à des plissements, torsions et inclinaisons.

La formation des failles est une manifestation marquante des mouvements de la croûte terrestre, ou plutôt de leurs effets, représentant une décharge intermittente des contraintes de cisaillement tectoniques accumulées. Ce mécanisme est d'un intérêt spécifique pour la sécurité des barrages et c'est le sujet principal des présentes Recommandations. Toutefois, il faut se rappeler que la formation et l'activité des failles sont seulement une forme spécifique (détente intermittente) de décharge de l'énergie accumulée. La plupart des déformations tectoniques se développent sous forme de fluage. De tels mouvements de surface affectent de larges blocs de la croûte terrestre (se développant et évoluant, en règle générale, très lentement), et contiennent toutes les composantes spatiales de mouvement, s'exprimant à des degrés variables.

Si le corps du barrage est placé sur un tel bloc, subissant un mouvement homogène et sans singularités dans le cadre du corps de barrage, il y a de fortes chances que le barrage puisse s'adapter à de tels mouvements sans problèmes structuraux, au moins pendant la vie utile de l'ouvrage. Les barrages en remblai avec noyau d'argile et les barrages-poids avec joints conçus pour supporter des mouvements différentiels modérés peuvent s'adapter sans difficultés à de telles conditions.

Les problèmes surviennent quand le barrage est situé près de la limite du bloc mobile, de sorte que les effets locaux de mobilité due au fluage de la croûte terrestre affectent de façon cumulative certains éléments du corps de barrage. Statistiquement, de telles situations sont rares. Le comportement du barrage Bajina Basta (exposé au Chapitre 9) est un tel cas. Les couches de fondation de ce barrage (schistes argileux Paléozoïques compressibles) sont affectées d'un mouvement de fluage latéral constant (mouvement quasi stationnaire pendant les trente dernières années, comme confirmé par des mesures géodésiques approfondies) qui entraîne le corps du barrage vers la rive gauche. Sur cette rive gauche, une situation singulière s'est développée lorsque les plots d'extrémité du barrage-poids évidé furent poussés vers un large bloc de mélaphyres, empêchant tout mouvement latéral ultérieur. Comme conséquence, une interaction complexe en flexion et extension s'est développée dans les deux derniers éléments poids-évidés du barrage, conduisant à des fissures qui ont nécessité des travaux de réparation. Le mouvement de fluage de

5. EVALUATING THE EFFECTS OF CRUSTAL MOVEMENTS ON DAMS

Crustal movements include all of the movements in the earth crust, including faulting, isostatic movements and crustal deformations, ranging from creep movements at boundaries of crust blocks to more complex movements with horizontal and vertical components, resulting in folding, torsions and tilting.

Faulting is a prominent manifestation of crustal movements or rather of their effects, being intermittent shearing release of accumulated tectonic stresses. It is of specific interest for dam safety and is therefore the main topic in these Guidelines in view of the nature in which faulting potentially affects the dam structures. But faulting is only a specific (intermittent rebound) form of releasing the accumulated strain energy. The preponderant part of tectonic deformations develops in the creep form. Such areal movements encompassing large blocks of the earth crust, usually develop and evolve slowly and contain all spatial components of movement, expressed in various degrees.

If the dam body is placed on such a block, undergoing homogeneous movement without singularities within the reach of the dam body, the prevailing chances are that the dam can accommodate such movements without structural problems, at least for the duration of the dam service life. Fill type dams with clay cores and gravity dams with joints designed to accommodate moderate differential movements can successfully adapt themselves to such conditions.

Problems arise when the dam is placed near the boundary of the mobile crustal block, so that local effects of creeping crustal mobility are affecting in a cumulative manner some structural parts of the dam body. On statistical basis, such outcome seems to be comparatively rare. The behavior of Bajina Basta Dam (reported in the Chapter 9) is one of such cases. The foundation strata of this dam (compressible Paleozoic shales) are in continuous left lateral creeping movement (quasi-stationary over the last 30 years, as confirmed by constant and very comprehensive geodetic measurements) carrying the dam body towards the left abutment. There, a singular situation developed as the terminal hollow gravity elements were thrust upon a large massif of melaphyres, which precludes further movement. As a consequence, a complex bending and extentional interaction developed in the two last hollow elements of the dam, leading to appearance of cracks which required remedial works. The creeping crustal movement which caused this problem is remarkably stationary with yearly increments of 1 to 2 mm per year. The dam is now

la croûte terrestre, qui a causé ce problème, est remarquablement quasi stationnaire, avec des incréments annuels de 1 à 2 mm. Le barrage est maintenant renforcé et sous contrôle pour une période relativement longue; il peut être ultérieurement renforcé, si nécessaire.

Ce cas illustre la nature des problèmes auxquels on peut avoir à faire face lorsque se présente une mobilité de la croûte terrestre. Sans la singularité existant sur la rive gauche, le barrage aurait pu s'adapter à la mobilité de la croûte de cette intensité (comme les autres vingt éléments poids-évidés l'ont fait, du fait que les joints entre les éléments avaient été conçus pour s'adapter à des mouvements différentiels importants). Après des études approfondies, on considère maintenant que la mobilité de la croûte terrestre sur ce site est liée à la mobilité d'une zone plus étendue, au large de la rive droite du site.

De cette expérience, on tire la conclusion que, dans des cas sensibles, la première démarche est de rechercher des informations sur des conditions identiques. L'étude de photos aériennes et des analyses morphologiques sont nécessaires, bien que les résultats concluants doivent être basés sur des observations géodésiques suffisamment longues. Les études régionales de mobilité de la croûte terrestre constituent le meilleur indicateur. Dans le cas de Bajina Basta, de telles informations étaient disponibles pour une zone s'étendant au large de l'appui rive droite, mais n'avaient pas été prises en considération étant donné le manque d'expérience sur ce type de phénomènes (barrages et mouvement de fluage de la croûte). Une autre conclusion est qu'il serait utile d'appliquer aux bassins versants importants la triangulation par satellites (GPS) pour indiquer les régions où la mobilité de la croûte se manifeste, de manière à pouvoir prendre en considération ce phénomène lors du choix des sites et des types pour les barrages futurs.

Quand les indications sont positives dans ce sens, le projet du barrage doit être adapté à de telles conditions (barrage en remblai, ou joints entre les plots d'un barrage en béton, capables de supporter des mouvements différentiels), ou bien de tels sites doivent être évités.

Quand les vitesses de déformations différentielles sont considérables (par exemple, dépassant un mm par an), il est recommandé d'éviter un tel site. La difficulté pratique pour une prise de décision est que des mesures très fiables sont nécessaires sur une période significative (de l'ordre de dix ans) pour évaluer le risque en question.

La mobilité de la croûte terrestre du type décrit ci-dessus est en général moins fréquente et moins dangereuse pour les barrages que la rupture d'une faille en surface.

strengthened and under control for a long period and can be further protected if found necessary.

This case is illustrative for the nature of problems which can be faced when dealing with the crustal mobility. If it were not for the singularity present at the left abutment, the dam could have safely accommodated the crustal mobility of this intensity (as the rest of some 20 hollow gravity elements did, without structural problems, as their joints were designed to accommodate significant differential movements). After comprehensive studies it is considered now that the mobility of this dam site is linked to the mobility of a larger region in the background of the right abutment.

From this experience conclusion is reached that in susceptible cases the first step is to look for pointers to similar conditions. Study of aerial photographs and morphological analyses are necessary although conclusive findings are to be based on relevant geodetic observations. And the best early indicator are the regional studies of crustal mobility. In Bajina Basta case such information was available for the far background on the right bank but was not taken in consideration due to lack of experience with this kind of phenomena (dams and creeping crustal mobility). But it would generally be useful to keep important watersheds under GPS surveying, singling regionally areas where crustal mobility is expressed, so that this feature could be taken into account when selecting future dam sites and types.

When indications are positive in this sense, the dam design should be adapted to such conditions (fill dam type or joints between concrete elements enabled to accommodate differential movements) or such sites should be avoided.

When the velocities of differential deformations are prominent (e.g. exceeding the yearly rate of a mm) such site should be avoided. The practical difficulty of decision making in that respect is that very reliable measurements are needed over a significant period (say ten years) to evaluate such hazard.

The areal crustal mobility of the described type is in general less frequent and less potentially dangerous for the dam structures than the surface faulting.

6. RUPTURE DE FAILLES EN SURFACE SUR LE SITE ET MOUVEMENTS ASSOCIÉS

Quand une faille traverse les fondations d'un barrage, deux questions fondamentales sont à examiner et des réponses fiables à apporter :

- est-ce que la faille en question est actuellement active?
- à quelle grandeur de déplacement faut-il s'attendre?

La première question a été examinée en détail dans les précédents chapitres.

Quand la faille traversant le site est considérée comme active, la seconde question concernant l'estimation du déplacement de la faille est alors de première importance si l'on décide de construire un barrage sur un tel site. Car alors l'évaluation prudente du déplacement de la faille devient une donnée de base du projet.

Il est tout à fait naturel de s'appuyer sur une corrélation entre, d'une part, la longueur de la faille active et la magnitude estimée du séisme associé, et, d'autre part, le déplacement de la faille. Plusieurs formules de ce genre sont utilisées. Divers auteurs ont étudié les caractéristiques des failles observées (en règle générale, la longueur et le déplacement de la faille) et effectué des analyses de régression de magnitude sur la longueur et le déplacement de la faille. Les résultats montrent des relations du type suivant :

$$M = a + b \log L$$

$$M = c + d \log D$$

où L est la longueur de la faille, D son déplacement et M la magnitude sur l'échelle de Richter.

De façon identique : $\log D = e \log L$

est la relation entre la longueur connue L et le déplacement probable D de la faille.

Les constantes a , b , c , d et e sont à déterminer par des méthodes d'ajustement, généralement par régression linéaire aux moindres carrés des magnitudes sur les valeurs logarithmiques des paramètres de rupture dépendants (comme la longueur de la rupture en surface ou en sous-sol, et le déplacement en surface, maximal ou moyen).

Un certain nombre d'auteurs ont traité cette question en appliquant diverses techniques. Dans la plupart des cas, la magnitude M , des ondes de surface est prise en considération comme variable dépendante ou indépendante. Un exposé complet sur cette question est donné par Bonilla [1], indiquant les représentations graphiques et les données d'observations prises en compte.

Une présentation très récente et très complète est donnée par D. L. Wells et K. J. Coppersmith [20], s'appuyant sur une base de données sismiques mondiales comprenant plus de 400 séismes et développant des régressions de magnitudes sur

6. ON-SITE SURFACE FAULTING AND RELATED MOVEMENTS

When a fault is crossing the dam foundations, two basic questions need to be analyzed and reliably answered :

- is the fault under consideration active at the present time?
- what size of fault displacement has to be expected?

The first question has been discussed at length in previous Chapters.

When the fault crossing the dam site is considered active then the second question concerning the estimate of the fault displacement becomes of primary importance, if it is decided to build a dam on such a site. For then the conservative estimate of displacements is the necessary design input.

It is quite natural to correlate the length of active fault and the expected magnitude with the expected fault displacement. Several such formulas are in use. Different authors have treated the observed fault characteristics (mainly the fault length and displacement) and performed regression analyses of magnitude on length and displacement. The results show relations of the type :

$$M = a + b.\log L$$

$$M = c + d.\log D$$

where L is the fault length, D the fault displacement and M is the Richter magnitude.

Similarly $\log D = e.\log L$

for the relation between the displacement D and known length L of the fault.

The constants a, b, c, d and e are to be derived from best fit procedures, usually by linear least-squares regression of M and log values of dependent fault rupture parameters (like surface or subsurface fault rupture length and maximum or average surface displacements).

A number of authors have treated this matter applying various techniques. In most cases the surface waves magnitude M_s was taken in consideration, either as dependent or independent variable. A comprehensive treatment of this matter is given by Bonilla [1], showing graphical presentation and background observational data.

A very recent and most comprehensive presentation is given by D. L. Wells and K. J. Coppersmith in [20] based on analyzing a worldwide seismic database including more than 400 earthquakes, developing regressions of magnitude and fault rupture

les paramètres de rupture de faille. Au lieu de la magnitude de l'onde de surface M_s (qui est appliquée dans la plupart des analyses de régression), la magnitude de moment sismique M est appliquée. C'est la valeur de magnitude associée au moment sismique M_0 , suivant la relation $M = 2/3 \log M_0 - 10,7$.

Le moment sismique est défini physiquement comme suit : $M_0 = m.D.A$, où m est le module de cisaillement, D le déplacement moyen sur la surface de faille et A la surface de faille. On calcule la valeur de M_0 en appliquant les techniques sismologiques correspondantes [20]. Les valeurs de M_s et M déduites d'événements sismiques réels sont pratiquement égales pour les magnitudes supérieures à 5,7 (jusqu'aux valeurs maximales), mais dans le champ des magnitudes entre 4,7 et 5,7 la valeur de M_s est systématiquement inférieure à la valeur de M . La raison principale de préférer M à M_s , comme base des régressions, est le fait que les mesures des ondes de surface deviennent saturées pour les magnitudes très grandes et que les corrélations basées sur M sont plus efficaces et fiables.

Des explications détaillées, les bases de données et les présentations graphiques des paramètres de rupture de faille (la longueur et la largeur de faille et ses déplacements en surface), avec adoption de corrélations basées sur M , sont données dans le document référencé [20] et peuvent être utilisées pour évaluer les variables dépendantes.

Les informations actuelles obtenues après de grands événements sismiques montrent que les déplacements différentiels des failles se classent entre des valeurs inférieures au mètre et des valeurs décimétriques. L'évidence géologique indique des potentiels encore plus grands. En considérant ce problème, il est important de bien comprendre que la confirmation ou l'exclusion de l'activité tectonique contemporaine est le trait décisif. Si une activité tectonique contemporaine est confirmée et conduit à prendre en considération des mouvements différentiels soudains le long d'une faille dans les fondations, il est fortement recommandé d'abandonner le site. Mais si un barrage doit être construit sur un site actif, un barrage en remblai de conception prudente est une solution qui s'impose, ce type de barrage étant capable d'absorber dans une certaine mesure les mouvements différentiels résultant d'une rupture de faille; et il vaut mieux dans ce cas écarter le choix d'un barrage en béton. Si un barrage en béton est envisagé sur un site actif, alors toutes solutions avec joints spéciaux sont à examiner de très près, en sachant que les très grands déplacements ne peuvent être absorbés avec succès. De puissants séismes pouvant causer de tels déplacements élevés, la solution qui s'impose est d'abandonner le site ou de construire un barrage en remblai, comportant des dispositions appropriées et capable d'absorber un déplacement de la faille jusqu'à une certaine valeur. Si un joint spécial est prévu dans un barrage en béton, le mouvement estimé doit alors se situer au-dessous d'une limite choisie préalablement; c'est une contrainte qui conduit à l'utilisation d'un tel joint comme mesure de précaution. Mais lorsqu'un mouvement régulier et limité est prévu, on a utilisé de tels joints, comme dans le cas du barrage Clyde [17].

parameters. Instead of surface-wave magnitude M_s (applied in most regression analyses) the moment magnitude \mathbf{M} was used. This is a magnitude value linked to the seismic moment M_o following the relation $\mathbf{M} = 2/3 \cdot \log M_o - 10.7$.

The seismic moment is physically described as $M_o = m \cdot D \cdot A$ where m is the shear modulus, D is the average displacement across the fault surface and A is the fault surface. M_o is computed applying the corresponding seismological techniques [20]. The M_s and \mathbf{M} values derived from actual seismic events are practically equal for magnitudes larger than 5.7 (up to the highest values) but in the range of magnitudes 4.7 to 5.7 M_s is systematically smaller than \mathbf{M} . But the main reason of preferring the \mathbf{M} instead of M_s based regressions is the fact that the surface waves measurements become saturated for largest magnitudes and that the \mathbf{M} based correlations are much more efficient and reliable.

Detailed explanations, the related comprehensive data base and graphical presentations of fault rupture parameters (rupture length, width and surface displacements) using \mathbf{M} based correlations, are shown in [20] and can be used to estimate the expected dependent variables.

The actual information obtained after large seismic events shows that fault differential displacements range from submetric to metric and up to decametric size. Geological evidence points to even larger potentials. When considering this problem it is important to grasp that the confirmation or discarding of contemporaneous tectonic activity is the decisive feature. If a contemporaneous tectonic activity is confirmed and leads to taking into account sudden differential movements along a fault in the foundation, it is highly recommended to abandon the site. But if a dam has to be built on an active site, a conservatively designed embankment dam is a compulsory solution, able to absorb the differential movements to a certain degree) declining the choice of a concrete dam. If a concrete dam is associated with an active site, then all solutions (special joints) are of mitigating nature, not being able to absorb successfully very large displacements. Whatever the actual amount of expected movement (being important in any case) but knowing that it has got to be significant for a strong earthquake, leads to the conclusion to abandon the site or to construct an embankment dam with adequate features (able to absorb a fault movement of a certain size) . If a special joint is foreseen in concrete dam, then the expected movement must be contained below a limit set beforehand and this is a constraint which permits to use the mentioned joint only as a mitigating feature. But when regular and limited movement is assessed, such joints were used, as shown in the case of the Clyde dam [17].

7. INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ TECTONIQUE SUR LE CHOIX DU SITE DE BARRAGE, DU TYPE DE BARRAGE ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

7.1. INFLUENCE SUR LE CHOIX DU SITE DE BARRAGE

L'activité tectonique et la mobilité de la croûte terrestre sont les traits qui peuvent influencer profondément le choix du site de barrage, le projet de barrage, le comportement du barrage en service et le niveau de sécurité du barrage. Il est, par conséquent, évident que des études et reconnaissances adéquates doivent à cet égard être réalisées, comme exposé dans les chapitres précédents. Lors du choix du site d'un barrage, une évaluation prudente du potentiel de l'activité tectonique contemporaine doit être prise en considération. Lors de la comparaison des sites possibles, ceux qui sont les moins affectés par des phénomènes tectoniques présentent un avantage, même si l'activité actuelle n'est pas prouvée [12].

La situation peut évoluer lorsque le potentiel d'activité de la faille sur le site d'un barrage est incertain et lorsque le géologue ne peut pas formuler une conclusion décisive sur la capacité de la faille en question. Dans ce cas, l'ingénieur responsable des études du barrage doit prendre une décision, après avoir examiné toutes les questions qui se posent. Mais la règle générale dans de telles situations est de se pencher du côté de la sécurité, car la nature du problème exige une approche tout à fait prudente. À ce propos, deux grands barrages, construits sur le fleuve Yenisei en Sibérie et sur la rivière Chirchik en Ouzbékistan, constituent des cas très intéressants.

Le barrage Sayano-Shushenskaya sur le Yenisei est un ouvrage du type poids-voûte, de 242 m de hauteur, et est une des réalisations marquantes dans la construction des barrages. Lors du choix du site, un emplacement beaucoup plus favorable du point de vue topographique a été abandonné, car des traces de récents mouvements tectoniques avaient été décelés pendant les reconnaissances du site. Un site plus large conduisant à des dépenses plus grandes a été choisi, en vue d'obtenir une situation plus rassurante du point de vue de l'activité tectonique possible.

L'autre exemple est le barrage Charvak sur la rivière Chirchik, barrage en remblai de 168 m de hauteur. Le choix du site a été déterminé par les conditions structurales et tectoniques et par le potentiel de mouvements tectoniques contemporains. Le site en amont offrait une topographie plus favorable, mais de récents mouvements tectoniques avaient été détectés sur une faille avec chevauchement avoisinante. Le barrage a été construit finalement sur un site plus large mais plus favorable du point de vue tectonique.

Des reconnaissances et considérations identiques seront appliquées pratiquement pour tout grand barrage, avec évaluation de sa sécurité vis-à-vis de la rupture de failles en surface et de la mobilité tectonique de la croûte terrestre.

7. EFFECTS OF ACTIVE TECTONIC FEATURES ON SELECTION OF DAM SITES, TYPE OF DAMS AND CONSTRUCTION DETAILS

7.1. INFLUENCE ON SELECTION OF DAM SITES

The tectonic activity and crustal mobility are features that can influence deeply the selection of dam sites, the design features of dams, the performance of dams in service and the achieved degree of dam safety. It is therefore quite clear that adequate studies and investigations must be realized in this respect, as outlined in the preceding pages. While selecting the dam site, conservative evaluation of contemporaneous tectonic activity potentials has to be taken in consideration. While comparing prospective sites, the less tectonically affected ones retain it as an advantage, even if the present activity is not proven [12].

Situation may develop when fault activity potential of a dam site is uncertain and the geologist in charge cannot make decisive conclusions as to the capability of the foundation fault. Then the dam engineer must formulate the decision considering all the issues. But a general rule in such situations is to lean towards the side of safety because the nature of the problem requires quite a conservative approach.

Quite interesting in the above respect are two large dams realized on the Yenisei River in Siberia and on the Chirchik River in Uzbekistan. The Sayano-Shushenskaya Dam on the Yenisei is an arch gravity structure 242 m high and one of the outstanding realizations in dam building. While selecting the site a topographically quite more favorable alternative site was abandoned because traces of young tectonic movements were found during the site investigations. A wider site requiring more expenses was selected in order to achieve more reliable position regarding safety in view of possible tectonic activity.

The other example is the Charvak Dam on the Chirchik River, a 168 m high embankment dam. The dam site selection was determined by structural and tectonic conditions and by the potential for contemporaneous tectonic movements. The upstream site offered more favorable topography, but on a nearby thrust fault young tectonic movements were detected. The dam was finally constructed on a wider but tectonically more reliable site.

Similar investigations and considerations should be undertaken for practically any large dam, evaluating its safety in view of the possibility of fault breaking and crustal mobility.

7.2. INFLUENCE SUR LE PROJET DE BARRAGE

Il y a toutefois des cas où il n'est pas possible de trouver un site plus sûr du point de vue tectonique. Dans de tels cas, on doit éliminer, de préférence, les barrages en béton. Un barrage en remblai de conception prudente sera étudié. Des joints spéciaux peuvent être introduits dans les barrages en béton comme mesure de précaution, lorsqu'on s'attend à des mouvements de faille bien définis. Mais cette solution peut s'avérer tout à fait inefficace si un mouvement inattendu intervient. Deux exemples significatifs de tels joints spéciaux au-dessus de failles traversant les fondations de barrages en béton sont fournis par le barrage Clyde en Nouvelle-Zélande et le barrage Inguri en Géorgie [13, 17].

Dans le cas du barrage Clyde, un mouvement différentiel de 20 cm sur la faille (secondaire par rapport à la faille principale) était considéré comme possible. Un joint vertical ouvert fut introduit afin d'absorber un mouvement (normal et inverse) jusqu'à 20 cm, le long de la faille inclinée de 70°.

L'autre cas se réfère au barrage-voûte Inguri, de 271 m de hauteur. Une faille importante traverse l'appui rive droite du barrage. Les 75 m supérieurs en profondeur et 140 m en longueur, le long de la faille sous le barrage, furent ouverts, purgés et bloqués par du béton (de façon continue sur les 40 premiers mètres en profondeur et de façon discontinue sur les 35 mètres restants). D'autre part, le large socle au-dessous du joint périmétral (enjambant la faille), sur lequel la voûte s'appuie, est divisé par des joints supplémentaires spéciaux capables d'absorber un mouvement différentiel de 10 cm le long de la faille, sans affecter sensiblement l'état des contraintes dans le corps du barrage.

Les deux exemples illustrent le rôle de tels joints spéciaux qui sont efficaces pour des mouvements restreints et bien définis.

Par contre, une grande confiance est accordée au barrage en remblai, bien conçu, pour absorber sans rupture les mouvements importants le long d'une faille traversant la fondation du barrage. La même conclusion, et avec plus de confiance, est valable pour les mouvements différentiels de la croûte terrestre (fluage le long de la faille ou mouvements de surface).

Cette confiance est basée sur le fait que, si le barrage en remblai est conçu avec de larges zones de transition constituées de matériaux sans cohésion, les fissures et les ouvertures (résultant de la rupture de la faille) ne peuvent rester ouvertes, le matériau sans cohésion devant fermer et colmater les dégâts subis par le noyau du barrage et par la partie de la fondation avoisinant le noyau. De telles zones de transition, suffisamment larges et de bonne granulométrie, sont à placer de chaque côté du noyau, afin que (outre l'action de colmatage déjà mentionnée) le traitement du noyau par injection soit possible. Les barrages Coyote et Cedar Springs sont des exemples d'une telle philosophie de conception [3].

Bien qu'aucun barrage présentant de telles dispositions n'ait été exposé jusqu'à présent à l'épreuve d'une rupture de faille dans les fondations, notre connaissance générale du comportement des barrages ainsi conçus appuie la recommandation d'appliquer de telles dispositions de projet quand la construction du barrage sur une faille active ne peut être évitée.

En ce qui concerne les ouvrages annexes des barrages, certains éléments sensibles (comme les tours libres et les galeries traversant les fondations du barrage) doivent être évités. Mais il s'agit d'une question spéciale nécessitant des considérations séparées.

7.2. EFFECT ON THE DESIGN

But there are cases when it is not possible to find a tectonically more reliable site. In such cases, concrete dams should preferably be eliminated as an advisable choice and an embankment dam with conservative features is to be considered. While special joints in concrete dams can be introduced with a measure of confidence in cases when a well defined fault movement is expected, still it remains rather a mitigating feature which might turn quite ineffective if some unexpected kind of movement intervenes. Two significant examples of such special joints over faults cutting through the foundations of concrete dams are the Clyde Dam in New Zealand and the Inguri Dam in Georgia [17, 13].

In the case of the Clyde Dam a 20 cm differential movement at the fault (secondary to the main one) was considered possible. An open vertical joint was accommodated in order to absorb up to 20 cm normal and reverse movement along the fault inclined 70°.

The second case pertains to 271 m high Inguri arch dam. An important fault is intersecting the right bank. The upper 75 m in depth and 140 m in length (below the dam foundation and along the trace of the fault) were opened, mined, plugged with concrete (continually for the first 40 m and discontinually for the lower 35 m). On the contrary, the large saddle below the peripheral joint (spanning the fault) on which the arch dam is founded, is divided by special additional joints able to absorb 10 cm of differential movement along the fault, without affecting the state of stresses in the dam body.

Both examples illustrate the mitigating nature of such special joints, which are effective for restricted and well defined movements.

On the other hand, there is considerable confidence that a suitably designed embankment dam can accept without failure the large movements along faults intersecting the dam body. The same conclusion and with more confidence is valid for differential crustal movements (fault creep or areal displacements).

This confidence is stemming from the fact that if the embankment dam is designed with large cohesionless transition zones, cracks and openings (following the disruptive fault breaks) cannot last within the dam body as the cohesionless material must close and seal the injuries imparted to the dam core and to the part of foundations in the vicinity of the core. Such ample and well graded transition zones should be placed symmetrically on both sides of the core, in which case (apart from mentioned sealing action) subsequent grouting of the core is feasible. The Coyote and Cedar Springs Dam are examples of such design philosophy [3].

Although no dam with such features has been put through the fault breaking test to date, our general knowledge of the structural behavior of so designed dams supports the recommendation of such design features, in case the construction of a dam over an active fault cannot be avoided.

As for the works appurtenant to dams, some sensitive features (like free standing towers and culverts crossing the dam foundations) should be avoided. But this is a special topic requiring separate considerations.

8. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

8.1. Le problème des manifestations contemporaines de l'activité tectonique est tout à fait spécifique et impose des conditions rigoureuses au projet et à l'évaluation de la sécurité des barrages. Une faille active, avec menace de rupture à travers les fondations du barrage, est la marque la plus drastique de mouvements dans la croûte terrestre. Mais le fluage le long des failles ainsi que les mouvements intéressant un bloc interviennent également dans les phénomènes tectoniques actifs et font partie du même complexe physique.

Les manifestations dangereuses des mouvements tectoniques contemporains sont heureusement assez rares (sur l'échelle de la vie humaine et de la vie des barrages). Néanmoins, pour l'évaluation de la sécurité des barrages et pour le choix du site et du type de barrage, les conditions tectoniques dominantes doivent être prises en considération, et spécialement la possibilité de rupture actuelle d'une faille dans les fondations. Si la réponse à cette dernière question est positive, des conclusions très limitatives s'imposent au projet du barrage en question. Cette décision très importante doit être formulée par le géologue du barrage et avalisée par l'ingénieur chargé du projet.

8.2. Les phénomènes tectoniques survenus dans le passé ont laissé des traces sous forme de failles et d'autres marques tectoniques. De nombreuses failles traversent les fondations des barrages, mais seulement un petit nombre d'entre elles indiquent de façon évidente des mouvements récents, de sorte qu'on peut s'attendre à une reprise des mouvements durant la vie du barrage.

8.3. Aucun barrage en exploitation n'a subi à ce jour des cisaillements dus à la rupture d'une faille et très peu d'entre eux ont été affectés par des phénomènes de fluage, soit sous forme de mouvement intéressant un bloc, soit sous forme de fluage le long des lignes de failles. Par conséquent, dans un certain nombre de projets on a admis tacitement qu'aucune rupture de faille ou aucun dégât dû au fluage tectonique ne se produirait. L'absence de dégâts sérieux ou de rupture dus à ces effets valide statistiquement une telle pratique. Toutefois, certains cas indiquent qu'un tel danger est réel. L'augmentation du nombre de barrages fait que les sites des nouveaux barrages sont moins favorables et plus complexes du point de vue tectonique. Il est alors nécessaire de rassembler l'expérience acquise et de définir la stratégie technique pour faire face aux phénomènes complexes de l'activité tectonique et de leurs effets sur les projets et sur la sécurité des barrages. Les décisions sur le choix du site et des détails de conception doivent être basées sur de telles considérations.

8.4. Dans certains cas, il est impossible ou tout à fait défavorable d'éliminer un site de barrage présentant un risque d'activité de faille dans les fondations, surtout si les déplacements prévus ne sont pas élevés. Dans de tels cas, un projet prudent de barrage en remblai est la réponse, en adoptant de larges zones de transition composées de matériaux sans cohésion. Les effets des déplacements lors de la rupture d'une faille traversant les fondations d'un barrage peuvent différer d'un site

8. SUMMARY AND CONCLUSIONS

8.1. The problem of contemporaneous manifestation of active tectonics is quite specific and imposing stringent conditions to the design and safety evaluation of dams. The active fault, threatening with break through the dam foundations, is the most drastic possibility of crustal movement, but fault creep and areal movements also play a role in the active tectonic phenomena, being part of the same physical process.

The dangerous manifestations of the contemporaneous tectonic movements are fortunately rather infrequent (on human and dams time scale). Nonetheless, for the safety evaluation of dams and for selection of appropriate sites and design features, the prevailing tectonic conditions must be taken in consideration and specifically whether any fault breaking is to be expected at the present time. If the answer to this last specific question is positive, far reaching conclusions must be imposed on the design of the dam in question. This very sensitive decision must be formulated by the dam geologist and endorsed by the engineer in charge of the dam project.

8.2. Past tectonic phenomena have left traces as faults and other tectonic forms. Many faults are crossing the dam foundations but only few of them show clear evidence of recent movements so that repeated movements are expected during the lifetime of the dam.

8.3. No dam in active service has actually been subjected to shearing due to fault breaking and very few have been affected by creeping phenomena, either areal or along the fault lines. Therefore, in a number of designs, it was tacitly inferred that fault breaking or damage due to creep phenomena are not to be faced. The absence of serious damage or failure rather validates statistically such practice. Still, the existence of some near misses point to the fact that such danger is real. The increased number of dams increases the need to select new dams on less favorable and tectonically more intricate sites. This points to the necessity of collecting the existing experience and defining the engineering strategy while facing the complex phenomena of active tectonics and their effects on the design and safety of dam structures. The adopted site selection decisions and design details should be defined as a result of such considerations.

8.4. In some cases it is impossible or quite unfavorable to discard a dam site with potential for contemporaneous fault activity in the foundations. In such cases a conservative embankment dam design is the answer, applying large transition zones of non-cohesive materials. The effects of the fault break displacement passing through the dam foundations may differ from site to site not only due to differing fault features but also to its location and orientation with respect to the dam axis.

à l'autre, non seulement à cause des caractéristiques différentes de la faille, mais aussi du fait de sa situation et de son orientation par rapport à l'axe du barrage. La résistance sismique d'un tel barrage en remblai doit donc être étudiée en rassemblant toutes les informations disponibles. En outre, des observations sismiques à long terme de la faille en question sont nécessaires pour fournir des informations importantes pour le projet, l'exploitation et l'entretien du barrage.

L'adoption de joints spéciaux dans le corps des barrages en béton est une mesure de bon sens lorsque la cinématique des mouvements prévus de la faille est très claire, régulière et connue de façon fiable. Mais ce sont des contraintes plutôt sévères. En général, il est préférable d'éviter les barrages en béton pour les sites affectés par des failles potentiellement actives.

8.5. Chaque fois qu'une faille traverse le site d'un barrage et spécialement dans un milieu présentant une activité sismique, la question se pose de savoir si la faille est capable de rupture en surface sous le barrage pendant la vie de l'ouvrage. Les méthodes de reconnaissances et les principes d'évaluation sont exposés dans ce Bulletin. La question de base est la suivante : jusqu'où remonter dans le passé géologique ? L'évidence d'activité tectonique dans la période Holocène est la plus significative et fondamentale pour définir si la faille en question est active ou non. Cela ne signifie pas que l'évidence d'activité sismique dans le Quaternaire récent doit être négligée. Au contraire, cette information sera utilisée pour parvenir à une évaluation plus sûre de la période critique Holocène.

Les exemples présentés dans le Chapitre 9 indiquent que l'expérience acquise dans l'évaluation du potentiel d'activité tectonique contemporaine s'accumule et que les mesures des phénomènes tectoniques et sismiques se développent à un rythme croissant. Les observations géodésiques sont irremplaçables pour la détermination quantitative des mouvements en surface. La méthode GPS a de grandes possibilités et est de plus en plus appliquée. Enfin, les réseaux de stations sismologiques à courte période pour l'observation des séismes induits sont de plus en plus appliqués. Le groupement des emplacements des épicentres peut parfois indiquer la trace d'une faille active, comme dans le cas du barrage Mratinje.

En général, quand un mouvement important de faille est considéré comme raisonnablement possible, le meilleur conseil est d'abandonner le site et de choisir une solution moins hasardeuse. Jusqu'à présent, aucun barrage conçu pour absorber les mouvements d'une faille n'a été soumis à cette épreuve. Par conséquent, le critère principal de validation de nos projets, c'est-à-dire le comportement satisfaisant des ouvrages, est totalement absent dans ce cas.

8.6. Comme conclusion générale, on peut dire que le problème difficile et spécifique de la détermination du potentiel d'activité contemporaine des failles affectant les sites de barrages, attire de plus en plus l'attention professionnelle et le recours aux observations et mesures. Néanmoins, le problème est encore loin d'être clarifié à un niveau satisfaisant. D'autres faits mis en évidence par des observations sont nécessaires pour renforcer les critères techniques dans ce domaine. Mais il est clair que la pratique technique évolue maintenant d'une appréciation plutôt tacite vers une évaluation plus consciente des sites et des dispositions constructives des barrages, en considérant la possibilité de mouvements contemporains de failles.

The earthquake resistance of such embankment dam should therefore be analysed thoroughly putting together all necessary pieces of information available in each case. Besides, long term seismic observation of the fault is needed to provide information important for the design, operation and maintenance of the dam and antidisaster plans should be defined in order to reduce the downstream hazard.

Placing of special joints in concrete dams makes sense when the kinematics of the expected fault movement is quite clear, regular and reliably known. But this is a rather severe restriction. In general, concrete dams should not be selected for dams affected by potentially active faults.

8.5. Each time a fault crosses the dam site, especially in seismically active surroundings, the question that has to be answered is whether the fault is capable of surface breaking under the dam during its lifetime. Methods of investigations and principles of evaluation are outlined in this Bulletin, but the question governing the findings is : how far to reach in the geological past. The Holocene Epoch evidence of active tectonic features is the most significant and governing for the decision whether to consider the fault under investigation active or not. This does not mean that the evidence of tectonic activity in the late Quaternary should not be collected and studied. On the contrary, this information should be used to achieve more reliable evaluation of the critical Holocene Epoch.

The case histories presented in the Chapter 9 indicate that experience in evaluating the contemporaneous active tectonic potential is accumulating and that instrumental monitoring of tectonic and seismic phenomena is developing at an increasing rate. Geodetic observations are irreplaceable for the quantitative determination of surface movements. The GPS monitoring has large possibilities and is expanding. Finally, short period stations networks for monitoring of the triggered activity is also increasingly applied. Clustering of epicentral locations may sometimes indicate the trace of an actually active fault, as in the case of Mratinje Dam.

In general, when significant fault movement is accepted as a reasonable possibility, the best advice is to abandon the site and turn to a less hazardous alternative. To date, no dam that was designed to absorb the fault movement has ever been put through the test. Thus the main validation criterion in our designs, the successful performance, is utterly lacking in this case.

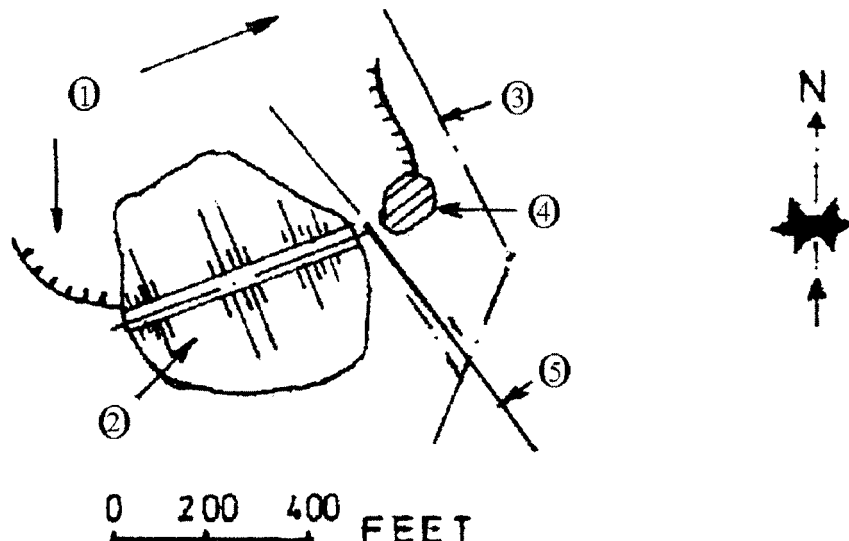
8.6. As a general conclusion it can be said that the difficult and specific problem of determining the present activity potential on faults affecting the dam sites is getting more attention and instrumental support, at ever increasing rate. Still, it is far from being clarified to a satisfactory degree and further observational evidence is needed to strengthen the engineering criteria in this field. But it is clear that from tacit assessment the engineering practice is now transiting towards more conscious evaluation of sites and dam features considering the possibility of contemporaneous fault movements.

9. EXEMPLES D'ACTIVITÉ TECTONIQUE CONTEMPORAINE AFFECTANT DES SITES DE BARRAGES ET DES BARRAGES EXISTANTS

Les premières informations directes sur des phénomènes tectoniques contemporains affectant des barrages (ruptures de failles et mobilité, du type fluage, de la croûte terrestre) sont associées aux séismes en Californie et à des barrages situés dans cette région. Les phénomènes périodiques le long de la faille San Andreas et de ses ramifications sont parmi les perturbations sismiques les plus fortes qu'on a observées et sont relativement bien documentés, en particulier pour les époques récentes.

9.1. BARRAGE SAN ANDREAS (ÉTATS-UNIS)

L'événement le plus spectaculaire concerne le barrage San Andreas, de 27 m de hauteur (construit il y a plus d'un siècle), qui en 1906 a été frappé par une rupture en surface de la faille San Andreas, lors d'un séisme de magnitude $M = 8,6$. La ligne de rupture de la faille traversait une petite arête entre le barrage principal et un barrage de col adjacent, provoquant un décrochement de 2,5 m sur la ligne de crête du barrage. Il est évident que le corps du barrage fut soumis à des secousses très intenses. La retenue était pleine et le barrage a bien résisté à cet événement. C'est une des confirmations qu'un barrage en remblai, conçu de façon prudente, peut résister aux secousses les plus fortes, sauf s'il y a danger de liquéfaction.



9. CASE HISTORIES OF CONTEMPORANEOUS TECTONIC ACTIVITY ON DAM SITES AND EXISTING DAM STRUCTURES

First direct information on tectonic phenomena influencing dams are linked to California earthquakes and dams present in this region. The recurrent phenomena along the San Andreas fault and its ramifications, are among the strongest seismic disturbances ever recorded and are relatively well documented, especially during the recent times.

9.1. SAN ANDREAS DAM (USA)

The most spectacular development pertains to 27 m high San Andreas Dam (more than a century old) which in 1906 was hit by a surface fault break along San Andreas fault during $M = 8.6$ event. The fault break line passed through a small ridge between the main dam and adjacent saddle dam, producing an off-set of 2.5 m in the crest line. It is evident that the dam body was subject to most intense shaking. The reservoir was full and the dam resisted successfully this event. This is the nearest miss on record and one of the confirmations that a conservatively designed embankment dam stands a good chance against the strongest quakes on records, except if the liquefaction danger is present.

Fig. 1

San Andreas Dam - Location of main fault break
(after Lawson, 1908) [3]

*Barrage San Andreas - Emplacement de la rupture de la faille
(d'après Lawson, 1908) [3]*

- ① San Andreas reservoir
- ② Main dam
- ③ Outlet tunnel
- ④ Saddle dam
- ⑤ Main fault

- ① *Retenue*
- ② *Barrage principal*
- ③ *Galerie d'évacuation*
- ④ *Barrage de col*
- ⑤ *Ligne de rupture de la faille*

9.2. BARRAGE UPPER CRYSTAL SPRINGS (ÉTATS-UNIS)

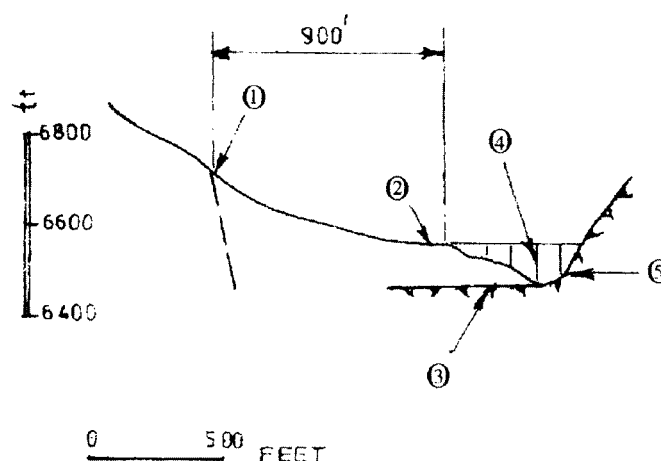
Le barrage Upper Crystal Springs a servi d'abord comme barrage et a ensuite été submergé à la suite de la construction d'un autre barrage à l'aval. La rupture de la faille San Andreas en 1906 a cisailé le barrage et provoqué un décrochement de 2,5 m en crête. C'est le seul impact direct connu, mais on ne sait pas quelle aurait été la réaction du barrage s'il avait été soumis à la pression unilatérale de l'eau. Toutefois, ce cas nous rappelle qu'un barrage a été affecté directement par une rupture de faille en fondation.

9.3. BARRAGE LOWER CRYSTAL SPRINGS (ÉTATS-UNIS)

Plusieurs barrages situés à proximité de la faille San Andreas ont généralement bien résisté à l'épreuve sévère à laquelle ils ont été exposés. Le cas du barrage Lower Crystal Springs (barrage-poids incurvé, de 43 m de hauteur) est particulièrement intéressant. Les analyses en retour ont montré que le projet du barrage était suffisamment prudent pour résister avec succès à de telles secousses extrêmes.

9.4. BARRAGE HEBGEN (ÉTATS-UNIS)

Le barrage Hebgen est un ouvrage en remblai situé au voisinage de la ligne de rupture en surface d'une faille qui a été activée lors du séisme de Yellowstone ($M = 7,1$) en 1951. C'est un barrage en remblai, de 27 m de hauteur, avec un écran central en béton. La ligne de rupture la plus proche était située à 200 m du barrage et son décrochement vertical était de 5 m environ. L'affaissement général de l'ensemble du barrage a été de 3 m environ. Pendant cet événement, la retenue était pleine et quelques seiches se formèrent, passant sur la crête du barrage. Mais les dégâts furent dans l'ensemble faibles et le barrage est resté en service, après avoir subi de tels impacts violents.



9.2. UPPER CRYSTAL SPRINGS DAM (USA)

The Upper Crystal Springs Dam first served as a dam and was then submerged by a downstream structure. The 1906 San Andreas fault break has sheared the dam and offset it by 2.5 m. This is the only known full direct hit, but we do not know how the dam would have reacted had it been exposed to unilateral water pressure. But still, it is a reminder that there was one direct hit.

9.3. LOWER CRYSTAL SPRINGS DAM (USA)

Several dams placed in immediate vicinity of the San Andreas fault have generally resisted well the severe test imposed on them. Especially interesting is the case of Lower Crystal Springs Dam (a 43 m high curved gravity structure). The back analyses have shown that the design was sufficiently conservative for the dam to resist successfully such extreme shaking.

9.4. HEBGEN DAM (USA)

The Hebgen dam is an embankment situated near the surface fault break which was activated during the Yellowstone earthquake ($M=7.1$) in 1951. This is a 27 m high embankment structure, with a central concrete core. The nearest fault break was 200 m distant from the dam and had a vertical movement of app. 5 m. The general subsidence of the whole dam amounts to about 3 m. During this event the storage was full and some seiches developed, spilling over the dam. But the general damage was moderate and the dam continued to serve, after being exposed to such extreme influences.

Fig. 2

Hebgen Dam - Longitudinal section through dam and fault [3]

Barrage Hebgen - Coupe longitudinale passant par le barrage et la faille [3]

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| ① Hebgen Fault break | ① Rupture de la Faille Hebgen |
| ② Spillway | ② Évacuateur de crue |
| ③ Bedrock surface | ③ Surface du fond rocheux |
| ④ Hebgen dam | ④ Barrage Hebgen |
| ⑤ Outlet tunnel | ⑤ Galerie d'évacuation |

9.5. RÉSERVOIR BALDWIN HILLS (ÉTATS-UNIS)

La rupture du réservoir Baldwin Hills en 1963 est tout à fait intéressante, car un mouvement de fluage de faille a été donné comme cause des fuites et de l'érosion progressive qui a détruit le barrage. L'évidence de phénomènes identiques de mobilité de la croûte terrestre et de déformations de fluage, endommageant des barrages existants, a été enregistrée dans quelques cas plus récents.

9.6. BARRAGE NUREK (TADJIKISTAN)

Il existe deux cas marquants où l'activité tectonique contemporaine était bien connue pendant les études et les reconnaissances, mais il n'était pas possible de trouver des sites plus favorables. Il s'agit de deux très grands barrages, chacun ayant plus de 300 m de hauteur et tous deux situés au Tadjikistan, sur la rivière Wakhsh.

Le premier est le barrage Nurek, de 305 m de hauteur, fondé sur un banc de grès qui n'était affecté par aucune faille importante. Mais les galeries de dérivation ont traversé une zone tectoniquement active présentant une mobilité de la croûte terrestre au voisinage immédiat du barrage. Les mouvements différentiels le long des lignes de faille, à cet endroit, étaient de l'ordre de 10 mm par an. Les mesures sur les fissures du revêtement en béton de la galerie de dérivation présentant une fissuration intense ont montré un allongement annuel de la galerie de 12 à 15 cm, comme mouvement cumulatif après intersection des différents blocs tectoniques [12]. On a alors décidé de bloquer la galerie de dérivation et de ne pas la transformer en galerie d'évacuation des crues, comme initialement prévu.

9.7. BARRAGE ROGUN (TADJIKISTAN)

Le second cas est beaucoup plus drastique. Il s'agit du barrage Rogun, de 330 m environ de hauteur, premier barrage à l'amont de Nurek, sur la rivière Wakhsh. La construction du barrage Rogun est commencée mais n'est pas encore achevée. La rivière Wakhsh coule généralement le long d'une faille très active et très profonde, qui court sur des centaines de kilomètres. Il était jugé inacceptable de construire un barrage sur une telle faille. Par conséquent, on a choisi le site du barrage Rogun sur un tronçon où la rivière quitte la faille principale. Mais il s'est avéré impossible d'éliminer la présence de failles moins actives dans les fondations du barrage (failles plus petites mais encore assez importantes et « capables », avec des longueurs atteignant cent kilomètres). Les failles traversant le site du barrage sont associées à la faille principale, en la rejoignant de manière caractéristique, en forme de fourche. Par conséquent, il n'y avait pas de doute sur la capacité des deux failles coupant transversalement le site du barrage. Ces failles forment le flanc soulevé d'un chevauchement important (avec une cinématique de rupture tout à fait défavorable). Une faille raide avec chevauchement (avec un bloc épais de sel situé à la limite aval de la faille active) intersecte la recharge située à l'amont du noyau du barrage. La même disposition est valable pour la faille un peu plus petite

9.5. BALDWIN HILLS RESERVOIR (USA)

The Baldwin Hills reservoir failure in 1963 is quite interesting, as creeping fault movement was cited as the cause of leaks and progressive erosion which destroyed the dam. Evidence of areal crustal mobility and creeping deformations, damaging existing dams, were recorded also in some more recent cases.

9.6. NUREK DAM (TAJKISTAN)

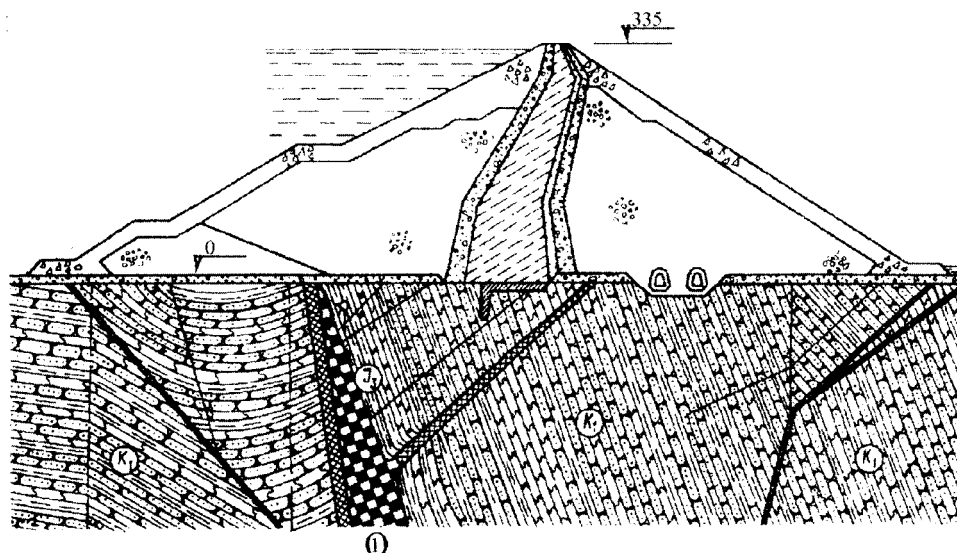
Two outstanding cases in which the present tectonic activity was well known during studies and investigations but it was not possible to find a more favourable site, are two very large dams, both higher than 300 m and both situated in Tajikistan on the Wakhsh river.

First is the 305 m high Nurek Dam and it was possible to place it on a stretch of sandstones not intersected by active faults. But the diversion galleries intersected the tectonically active zone of crustal mobility in the immediate vicinity of the dam, where differential movements along fault lines were of the order of 10 mm per year. Measurements on the fissures in the diversion gallery where the concrete lining cracked to a considerable extent, have shown the yearly elongation of the gallery to be 12 to 15 cm, as a cumulative movement after intersection of different tectonic blocks [12]. It was therefore decided to plug the diversion tunnel and not to transform it into the spillway outfall tunnel, as originally planned.

9.7. ROGUN DAM (TAJKISTAN)

The second case is much more drastic. It goes about 330 m high Rogun Dam, next dam upstream of Nurek, whose construction is started but not yet completed. The Wakhsh river flows generally along the very active and quite deep fault, running for hundreds of kilometers. To build any dam across such a fault was considered inadvisable and the Rogun Dam site was selected along a stretch where the Wakhsh leaves the master fault. But it was impossible to eliminate the presence of lesser active faults in the dam foundations (for an order of magnitude smaller faults but still quite important and capable, displaying lengths of about 100 km). The faults intersecting the dam site are associated with the master fault, joining it in a typical forking manner. So there was no doubt about the capability of the two faults transversely cutting through the dam site, forming the upthrown wing of an important thrust fault (quite unfavorable fault kinematics). A steep thrust fault (with a thick salt block bordering the active fault from the downstream side) intersects the dam section through the upstream supporting shell. The same is valid for a somewhat lesser fault intersecting the downstream supporting shell. It was instrumentally ascertained that while there is considerable differential movement along the transversal faults, the rock wedge between the upstream and downstream

intersectant la recharge aval. Les mesures ont montré que, si les mouvements différentiels le long des failles transversales étaient importants, par contre le coin rocheux entre les lignes de faille amont et aval, sur lequel le noyau du barrage est fondé, restait intact. On a donc conclu que le mouvement de faille affecterait les recharges amont et aval en enrochement, sans attaquer le noyau du barrage.



Pendant neuf ans, on a poursuivi l'observation des secousses sismiques et des mouvements différentiels annuels entre les lèvres des failles (par nivellement de haute précision). Une nette croissance des mouvements de fluage des failles coïncidait avec une augmentation de l'activité sismique.

Les projeteurs du barrage ont estimé (en se basant sur l'extrapolation de l'activité observée) que les mouvements différentiels le long des failles, pendant la durée de vie du barrage, pourraient atteindre un mètre, mais que les recharges amont et aval en enrochement seraient capables d'absorber de tels mouvements sans problèmes pour la stabilité du barrage. Des détériorations du noyau ne sont pas attendues, car la ligne de faille est subparallèle au noyau et en dehors de son emprise. Toutefois, le projet du barrage (noyau relativement épais et zones de transition symétriques amont et aval) assure une protection du barrage en remblai, même si le noyau est atteint par les mouvements des failles.

Ce barrage est un exemple marquant d'une solution qui accepte une activité importante de faille dans les fondations du barrage, en s'appuyant sur la capacité de résistance du barrage. L'achèvement de la construction de ce barrage est maintenant différé, ce qui pourrait permettre la collecte de nouveaux résultats de mesures sur ce site qui reste un exemple tout à fait significatif de traitement du problème de failles actives dans les fondations d'un grand barrage.

Les exemples suivants concernent trois barrages en Yougoslavie, chacun s'appuyant sur des mesures et observations de l'activité tectonique actuelle [9, 10, 15].

fault lines remains unbroken. So the fault movement shall shear through the upstream and downstream rock shell, not attacking the dam core.

Fig. 3
Rogun Dam cross section [12]
Coupe transversale du barrage Rogun [12]

① Main fault with salt deposition

① *Faïlle principale avec dépôt de sel*

On the main fault intersecting the Rogun Dam site, parallel monitoring of the number of seismic shocks, their cumulative intensity and yearly differential movement between the fault wings (determined by high precision levelling) was recorded during nine years. Sharp increase in fault creep movement coincided with increased seismic activity.

The assessment of the dam designers (based on extrapolation of the monitored activity) was that the differential movement along the faults and during the lifetime of the dam shall be up to one meter, but that the rock supporting shells shall be able to absorb such movements without problems for the dam stability. Damages to the core are not expected since the fault line is subparallel to the core and outside the core reaches. Still the design of the dam (relatively large core and symmetrical upstream and downstream transition zones) is of the nature to protect this embankment dam, even when facing shears through the core body.

This dam is an outstanding example of a solution accepting important fault activity in the foundations and relying on the dam resistance capabilities. The completion of this dam is now postponed and this might permit collecting of more instrumental data on this site, which is quite significant as an example of handling the problem of tectonically active faults in the foundations of a large dam.

Following are the three case histories of dams in Yugoslavia, each supported by instrumental measurements and observations of present tectonic activity [9 , 10 , 15].

9.8. BARRAGE BAJINA BASTA (YUGOSLAVIE)

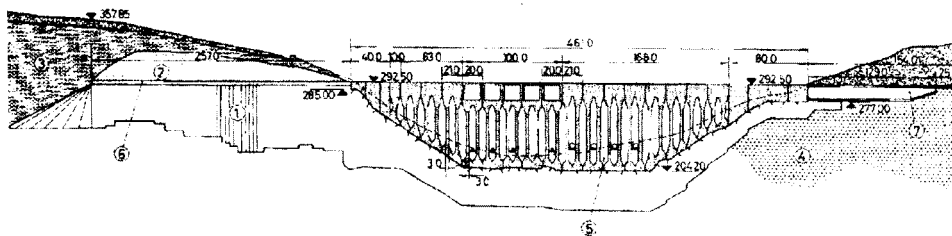
Le barrage Bajina Basta est du type poids-évidé, de 90 m de hauteur et de 450 m de longueur en crête, construit sur la rivière Drina. Le barrage est fondé sur des schistes argileux Paléozoïques compressibles, qui traversent en position anticlinale la rivière, l'axe de l'anticlinal étant subparallèle au cours de la rivière, les ailes plongeant à pic dans les deux rives. Une grande lentille de mélaphyres se trouve sur le sommet de la rive gauche, formant son arrière-plan, de sorte que le barrage (fondé sur des roches compressibles) vient s'appuyer contre des roches effusives rigides. Sur la rive droite, les roches Paléozoïques passent aux formations Triasiques qui s'élèvent en pente raide au-dessus du barrage pour constituer la montagne Tara. Les calcaires massifs Triasiques de la rive droite sont en contact avec une très grande masse d'ophiolites dont la genèse et le comportement tectonique ne sont pas bien connus. Mais il est bien établi que la montagne Tara est le siège de mouvements tectoniques lents de soulèvement. Les roches Paléozoïques dans les fondations du barrage sont entièrement tectonisées et contiennent beaucoup de failles mineures, fissures, plans de stratification et diaclases, mais sans failles longues et nettes, susceptibles de présenter des mouvements tectoniques contemporains.

Le barrage a été mis en eau en 1966 et a donc maintenant une trentaine d'années de service.

Dans un tel milieu géotechnique et tectonique, il était prévu que le barrage subirait des tassements et des mouvements horizontaux radiaux importants. Par contre, on s'attendait à des mouvements tangentiels horizontaux limités, comme cela est habituel sur les barrages-poids en béton.

Les tassements et les mouvements horizontaux (radiaux et tangentiels) ont été relevés par des mesures géodésiques. La crête, le parement aval et la surface des fondations étaient équipés d'un réseau dense de repères. Pendant les trente dernières années de service du barrage Bajina Basta, 68 opérations géodésiques complètes ont été réalisées. À l'aval du barrage, on a mis en place un réseau de contrôle relativement important et les résultats correspondants confirment que les mouvements mesurés sont fiables et donnent une image cohérente.

Les résultats des tassements et des mouvements radiaux horizontaux s'accordent bien avec les prévisions du modèle numérique. Mais les mouvements tangentiels (parallèles à l'axe du barrage) révélèrent bientôt une composante de mouvement vers la rive gauche, générale et persistante, de 1 à 2 mm par an.



9.8. BAJINA BASTA DAM (YUGOSLAVIA)

The Bajina Basta Dam is a concrete hollow gravity structure, with double buttresses, 90 m high and with 450 m crest length, situated on the Drina river. The dam body is founded on compressible Paleozoic shales which span in anticline position the Drina river, the anticline axis being subparallel to the river course and the wings steeply dip into both banks. A large lens of melaphyres forms the top of the left bank and also its general background so that the dam founded on very compressible rocks is abutting against rigid effusive rocks. On the right bank the Paleozoic rocks transit into the Triassic formations which above the dam rise steeply to form the Tara mountain, composed mainly of massive Triassic limestones underlain in the background by a huge mass of ophiolitic rocks, whose genetic history and tectonic role is not very well known. But it is a known fact that the Tara mountain mass exhibits slow heaving tectonic movements. The Paleozoic rocks in the dam foundations are thoroughly tectonized and full of minor faults, fissures, interbedding planes of weakness, cracks and joints, but without distinct and governing faults which could be suspected to form capable faults.

The dam was impounded in 1966, its age thus reaching now thirty years of service.

In such geotechnical and tectonic surroundings, it was expected that the dam shall have considerable settlements and horizontal radial movements but limited antimetric horizontal tangential movements, as it is usual with concrete gravity dams.

Settlements and horizontal radial movements were monitored by geodetic measurements, and both the dam crown, downstream face and foundation area were covered by a dense network of benchmarks and targets. During the past thirty years of Bajina Basta Dam service, 68 complete geodetic surveys were realized. A relatively large control network was deployed downstream of the dam and corresponding checking computations confirm that the measured dam movements are reliable and show a coherent overall picture.

The results of settlements and of downstream radial movements are in quite good agreement with computational models predicting the dam body movements. But the tangential movements (parallel to the dam axis) soon developed an overall and persisting componental movement towards the left river bank, amounting to 1

Fig. 4

Longitudinal section through Bajina Basta Dam [15]

Coupe longitudinale du barrage Bajina Basta [15]

- | | |
|--|--|
| ① Grout curtain | ① <i>Rideau d'injection</i> |
| ② Melaphyres | ② <i>Mélaphyres</i> |
| ③ Clayey and sandy schists | ③ <i>Schistes argileux et sableux</i> |
| ④ Compact schists with intercalation of sandstones | ④ <i>Schistes compacts avec intercalations de grès</i> |
| ⑤ Less compact schists | ⑤ <i>Schistes moins compacts</i> |
| ⑥ Grouting gallery | ⑥ <i>Galerie d'injection</i> |
| ⑦ Concrete diaphragm | ⑦ <i>Écran en béton</i> |

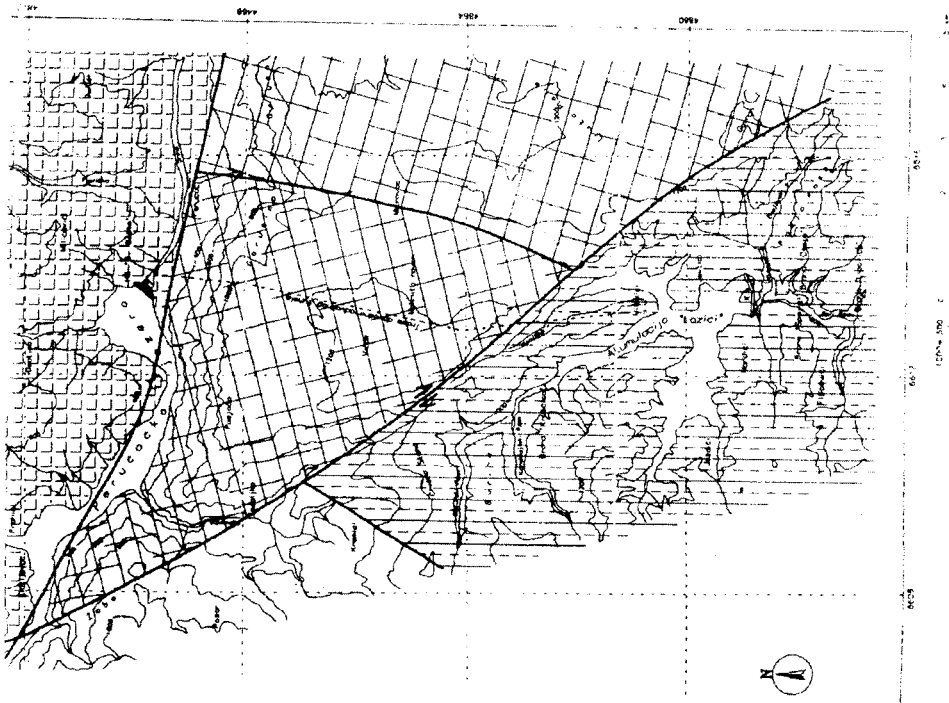
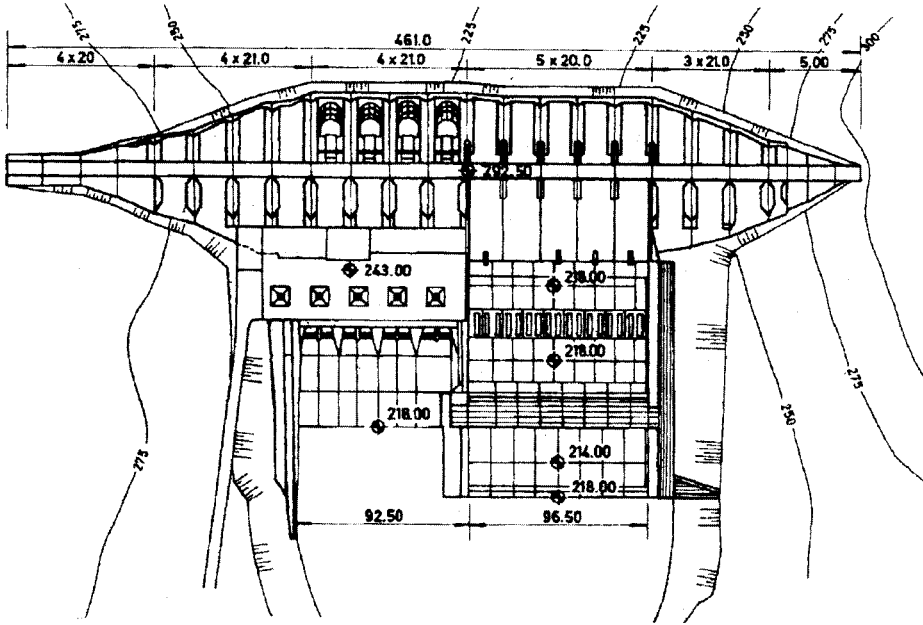


Fig. 5
Layout of Bajina Basta Dam [15]
Disposition générale du barrage Bajina Basta [15]

Fig. 6
Tectonic background of Bajina Basta Dam [15]
Arrière-plan tectonique du barrage Bajina Basta [15]

Actuellement, le mouvement tangentiel cumulé s'élève à 52 mm. L'origine est un mouvement général des fondations se répercutant sur l'ensemble du corps du barrage (avec de petites variations qui sont normales dans de telles mesures). Le barrage a été conçu pour des déformations des fondations relativement élevées et a supporté de façon très satisfaisante les mouvements mesurés sur le corps du barrage (avec des maxima de mouvements dans les trois directions spatiales, de l'ordre de 50 mm). La seule exception est la partie supérieure du versant rive gauche où les derniers éléments évidés s'appuient contre la masse rigide des mélaphyres qui ne suit pas le mouvement du reste des fondations (ce qui est confirmé par les mesures géodésiques sur les repères placés sur les mélaphyres). Les deux derniers éléments évidés, situés près du contact entre le Paléozoïque compressible et les mélaphyres rigides, ont subi des déformations complexes, imposées par les mouvements tangentiels et radiaux et par les conditions non homogènes aux limites, conduisant à des déformations de flexion et d'extension (en contraste avec le reste des 20 éléments évidés qui s'adaptent aux déformations des fondations comme des solides rigides libres). Comme conséquence, des fissures causées par la flexion et l'extension sont apparues sur les contreforts des deux derniers éléments mentionnés. Lorsqu'on a introduit l'état des déformations observées dans le modèle tridimensionnel aux éléments finis des deux éléments où des fissures sont apparues, les résultats de calcul ont montré une reproduction satisfaisante des champs des contraintes de traction.

Dans des conditions normales, la stabilité du barrage n'est pas compromise. Mais en vue d'augmenter la sécurité du barrage vis-à-vis des actions sismiques et de restituer le monolithisme initial de l'ouvrage, une opération de réhabilitation a été engagée, en appliquant des plaques de béton armé sur les faces latérales des contreforts fissurés, ces plaques étant fixées par des ancrages précontraints. De cette façon, les éléments réhabilités sont capables de résister, sans dommages supplémentaires, à une augmentation des déformations de torsion du même ordre de grandeur que celles qui se sont accumulées pendant les trente premières années d'exploitation du barrage. Si cette limite est dépassée, des mesures supplémentaires doivent être prises. Naturellement, une auscultation soignée de ce barrage doit être poursuivie.

Le barrage Bajina Basta est évidemment exposé à des mouvements lents et persistants de la croûte terrestre, influençant la forme anticlinale des couches Paléozoïques compressibles dans les fondations du barrage.

Ce barrage a été aussi affecté par une forte séismicité induite par la mise en eau de la retenue, avec une secousse maximale de magnitude $M = 4,7$. Des secousses aussi fortes ne se sont pas répétées depuis. Toutefois, en cours d'exploitation du barrage, 68 secousses sismiques, ayant des magnitudes M de 2 à 4,2, ont été enregistrées dans la région du barrage (sur un rayon de 30 km environ). Ces secousses ont probablement influencé le taux des mouvements tangentiels du barrage, mais il n'a pas été possible d'établir une relation claire. Le taux des mouvements tangentiels présente des variations, mais dans l'ensemble il montre une allure régulière. Il n'est pas exclu que les mouvements tangentiels puissent se ralentir et diminuer considérablement si l'anticlinal Paléozoïque est suffisamment comprimé contre le massif des mélaphyres situé sur la rive gauche. Mais il paraît plus probable qu'à l'échelle de la durée de vie du barrage, de tels mouvements continuent. Le programme des travaux de réparation (qui est en cours de réalisation) est basé sur cette prévision.

to 2 mm per year. At present, the cumulative tangential movement amounts to max 52 mm. And it is genetically an overall foundation movement which engages the dam body as a whole (with small variations which are expected in such measurements). The dam has been designed for relatively large foundation deformations and has responded quite favorably to observed dam body movements (which incidentally show maxima of movements of the order of 50 mm in all three spatial directions). The only exception is in the upper half of the left bank slope where the last hollow elements are abutting against the rigid mass of melaphyres, which is not moving with the rest of the dam foundations (this being confirmed by geodetically observed targets placed on the melaphyre rock mass). The last two hollow dam elements placed near the borderline of the compressible Paleozoic and rigid melaphyres, have undergone complex deformations enforced by tangential and radial movements and nonhomogeneous boundary conditions, dictating bending and extensional deformations (in contrast with the rest of 20 hollow elements which adapt themselves to foundation movements like free rigid solids). As a consequence, cracks due to bending and extension were induced into the buttresses of the mentioned two last hollow gravity elements. When the geodetically measured picture of the two mentioned hollow elements was introduced into 3 D finite elements models of the two dam elements where cracks appeared, satisfactory reproduction of tensile stress fields was obtained.

Under normal conditions, the dam stability is not endangered. But mainly in view to increase its safety against seismic influences and to recuperate the initial monolithism of the structure, the remedial action is taken applying reinforced concrete plates on the lateral faces of cracked buttresses and fixing them by prestressed anchors. The cracked elements are in this way enabled to undergo without further damages additional distortive deformations of the order which accumulated during last 30 years. If and when this limit is exceeded further measures shall be introduced. Understandably, close monitoring of this dam is to be continued.

The Bajina Basta Dam is obviously exposed to persisting crustal movements influencing the anticline form of compressible Paleozoic strata in the dam foundations.

This dam was influenced by strong induced seismicity upon impounding, peaking with a $M=4.7$ shock. Such strong shocks were not repeated later but during the service of Bajina Basta Dam 68 shocks of magnitude $M=2$ to $M=4.2$ were recorded in the dam region, within radius of some 30 km around the dam. These shocks have probably influenced the rate of tangential movements of the dam, but no clear relation was found. The rate of tangential movements is fluctuating but on the whole shows a steady trend. It is not excluded that tangential movements can slow and substantially decrease when the Paleozoic anticline is sufficiently compressed against the large melaphyre mass which is present at the left bank. But it seems more probable that on the time scale of the dam life such movements shall continue. The mentioned program of remedial works (which is now being realized) is based on such a premise.

Les raisons fondamentales de ces manifestations de l'activité tectonique contemporaine affectant le site du barrage Bajina Basta sont évidemment les influences tectoniques endogènes. Afin de mieux comprendre la situation dans la région du barrage, on a placé des lignes de nivellement de précision, partant du barrage et traversant la montagne Tara à l'arrière-plan de la rive droite. Deux branches de lignes de nivellement totalisent environ 20 km de longueur. On a trouvé que les calcaires massifs formant la montagne Tara (reposant partiellement sur les roches ophiolitiques qui sont peut-être allochtones) se soulevaient d'environ 10 mm par an (dans la zone des mouvements verticaux maximaux, assez loin du site de barrage). Prenant aussi en considération les blocs décelés par les études morphologiques et délimités par le réseau de ruptures existant sur le plateau de la montagne Tara à l'arrière-plan du barrage, on obtient une image cinématique logique, l'anticlinal présent au site du barrage poussant vers la rive gauche d'une manière compatible avec les mouvements observés. L'analyse détaillée de l'ensemble du système de ruptures (qui est étendu et complexe) indique l'existence de contraintes tectoniques et de mouvements des fondations du barrage dirigés vers la rive gauche.

La mise en évidence des faits énumérés (soulèvement du massif de la montagne Tara observé par nivellement de précision, réseaux de failles et de blocs définis par les études morphologiques) est considérée comme une étude qualitative corroborant le fait saillant des mouvements tangentiels du barrage qui ont causé des dégâts sur la rive gauche du barrage actuellement en cours de réparation. Les modalités et l'étendue des réparations ont été déterminées en extrapolant les déformations causales proportionnellement aux déformations totales mesurées pendant la période de 30 ans d'exploitation de ce barrage. Si cette valeur est dépassée, des mesures supplémentaires seront appliquées.

Toutefois, il est tout à fait réconfortant de constater que les analyses qualitatives des phénomènes géodynamiques aux environs du barrage Bajina Basta corroborent de façon logique les mouvements observés.

En vue de mieux clarifier les causes et les effets et d'obtenir une meilleure image des mouvements de la croûte terrestre dans l'arrière-pays du barrage Bajina Basta, on a mis en place un réseau GPS (Global Positioning System / Triangulation par satellites) dans une région plus étendue au nord du barrage Bajina Basta. Quarante points d'observation ont été installés en des points stratégiques, indiqués par les études morphologiques et tectoniques. Les mesures initiales sont déjà prises par des satellites en orbite et on prévoit que dans les années à venir une image plus complète et précise des mouvements de la croûte terrestre sera obtenue.

En même temps, le réseau d'auscultation sismologique concernant le barrage Bajina Basta et ses environs est en cours d'amélioration et d'extension.

L'image qui s'est matérialisée après trente ans d'observations du barrage Bajina Basta est que le barrage a bien répondu aux influences pour lesquelles il a été projeté, exception faite de la rive gauche éloignée où des conditions particulières ont nécessité certains travaux de réparation. Le facteur qui a influencé profondément les déformations globales du barrage et qui a causé des dégâts côté rive gauche est la mobilité de la croûte terrestre, intéressant les fondations du barrage et ses environs. Il est très difficile de généraliser dans un domaine tel que la

The underlying reasons for such manifestation of contemporaneous tectonic activity affecting the Bajina Basta Dam site are obviously the endogenous tectonic influences. In order to understand better the situation in the dam region, precision levelling lines were placed from the dam across the Tara mountain (two branches amounting to some 20 km in length). It was found that the limestone mass of the Tara mountain (partly underlain by possibly allochthonous ophiolitic rocks) are rising at a rate of some 10 mm per year (in the zone of maximum vertical movements in further background of the dam site). Considering also the blocks outlined by morphological studies and bordered by the rupturing network on the Tara mountain plateau in the background of the Bajina Basta Dam, a logical kinematic picture is obtained, the right wing of the anticline present at the dam site thrusting towards the left bank in a manner compatible with the observed movements. The detailed analysis of the whole rupturing system (which is quite extensive and complex) points to the existence of tectonic stress and corresponding dam foundations movement directed toward the left bank.

The enumerated supporting evidence (rising of Tara mountain monitored by the precision levelling network, the pattern of faults in the background and the system of blocks defined by morphological analyses) are all considered as qualitative studies supporting the hard fact of the dam tangential movement which has caused damage on the left bank of Bajina Basta Dam, now under repair. The modalities and scope of repair works were determined by extrapolating the causative monitored deformations by the amount commensurate to the cumulative amount of such deformations during the present dam life span. If and when this amount is surpassed, additional measures have to be considered.

Still it is quite comforting that qualitative analyses of geodynamic circumstances in the background of the Bajina Basta Dam support in a logical way the observed movements.

In order to advance further in the cause and effects clarification and to have better and more effective picture of crustal movements in the background of Bajina Basta Dam, the GPS (Global Positioning System) is deployed in a wider region north of Bajina Basta Dam. Forty observation points are distributed on strategic locations indicated by morphological and rupturing system studies. The zero measurement is already taken in relation to orbiting satellites and it is expected that within the next few years a more comprehensive and precise picture of crustal movements shall be obtained.

In the same time, the seismic monitoring system concerning the Bajina Basta Dam and its surroundings is being improved and enlarged.

The picture which has materialized after 30 years of service and monitoring of the Bajina Basta Dam, is that the dam has responded well to influences for which it was designed, except at the far left bank of the dam where peculiar circumstances required some remedial works. The factor which has deeply influenced the overall dam deformations and which has specifically caused structural damage at the left bank is the crustal mobility of the dam foundations and its wider surroundings. It is very difficult to generalize in such matters as crustal mobility and dam behavior, but

mobilité de la croûte terrestre et la réponse consécutive du barrage. Mais il est très probable que la mobilité de la croûte (qui est une forme de fluage tectonique) s'est manifestée sur un certain nombre de barrages et on doit la prendre en considération lors des études des projets de barrages situés en bordure de blocs tectoniques mis en évidence par les études morphologiques. La leçon qu'on peut tirer du comportement du barrage Bajina Basta est que sa caractéristique fondamentale de projet (les éléments poids-évidés indépendants, capables de supporter sans problèmes des mouvements différentiels même importants) est validée, car les éléments indépendants du barrage ont supporté de façon satisfaisante de tels mouvements. Lorsque cette condition fondamentale (éléments libres et indépendants) n'était pas observée (au contact avec les mélaphyres sur la rive gauche), la mobilité de la croûte terrestre sur ce site a causé des fissures.

Si la nature du problème avait été comprise dès le début du projet, on aurait probablement traité le contact entre le barrage poids-évidé et les mélaphyres rigides de la rive gauche de manière à absorber plus efficacement les mouvements différentiels dus à la mobilité de la croûte. Mais à l'époque de la préparation de ce projet, de tels problèmes n'étaient presque jamais traités de façon explicite dans les projets de barrages, ou du moins de telles expériences n'étaient pas disponibles. De toute façon, la zone endommagée est en cours de réparation et sera maintenue sous contrôle.

9.9. BARRAGE LIPOVICA (YOUgoslavie)

Les appareils de mesure ont confirmé l'activité tectonique contemporaine de la région de la montagne Tara, mentionnée en décrivant le cas du barrage Bajina Basta : sismicité modérée et mobilité de croûte assez manifeste.

Sur le plateau de la montagne Tara, un petit barrage-voûte, de 17 m de hauteur, a été construit il y a une dizaine d'années. Il sert à collecter les eaux du bassin versant local pour la retenue de l'aménagement réversible Bajina Basta. C'est une voûte mince dont les contraintes sont modérées du fait de la hauteur limitée du barrage. Le seul trait distinctif est l'existence d'une faille coupant les fondations à peu près au milieu du barrage suivant une direction radiale. Il s'agit d'une faille très nette, accompagnée d'une zone broyée. Aucun signe d'activité passée et présente le long de cette faille ne fut trouvé ni mentionné au cours de la préparation du projet.

Les déformations du barrage ont présenté au début une image normale, mais bientôt des déformations dissymétriques se sont développées, les repères d'observation sur la partie rive droite du barrage se déplaçant vers l'amont. Une telle déformation dissymétrique est compatible avec le mouvement de l'appui rive gauche du barrage vers l'aval. Des fissures résultant d'un tel mouvement se sont formées près de l'appui rive gauche.

Les mesures géodésiques sur ce barrage sont exécutées deux fois par an et montrent que les piliers d'observation sur la rive gauche se sont déplacés de plusieurs cm (après dix ans de service) par rapport aux piliers de la rive droite qui restent stables. Les mesures prouvent donc qu'on se trouve en présence d'un cas de fluage tectonique le long de la faille traversant la fondation du barrage Lipovica. Cela est confirmé par les mesures géodésiques et par les fissures qui se sont développées dans le corps du barrage.

it is quite probable that crustal mobility (which is a form of tectonic creep) manifested itself in a number of dams and that it should be kept in mind while designing dams in bordering zones of morphologically documented tectonic blocks. The lesson learned from the behavior of Bajina Basta Dam is that its basic design feature (independent hollow gravity elements enabled to undergo without problems even large differential movements) is validated because the independent dam elements have supported efficiently such movements. Only when this basic condition was not observed (contact with the melaphyres) cracks were induced, basically because of crustal mobility present at this site.

Had the nature of the problem at hand been understood from the beginning, probably the link of the hollow gravity dam and the rigid melaphyres would have been treated in a way to absorb easier the differential movements due to left lateral crustal mobility. But such problems were hardly ever explicitly treated in dam engineering practice. Anyhow the repairing works are under way at the damaged locality and the situation is and will be kept under control.

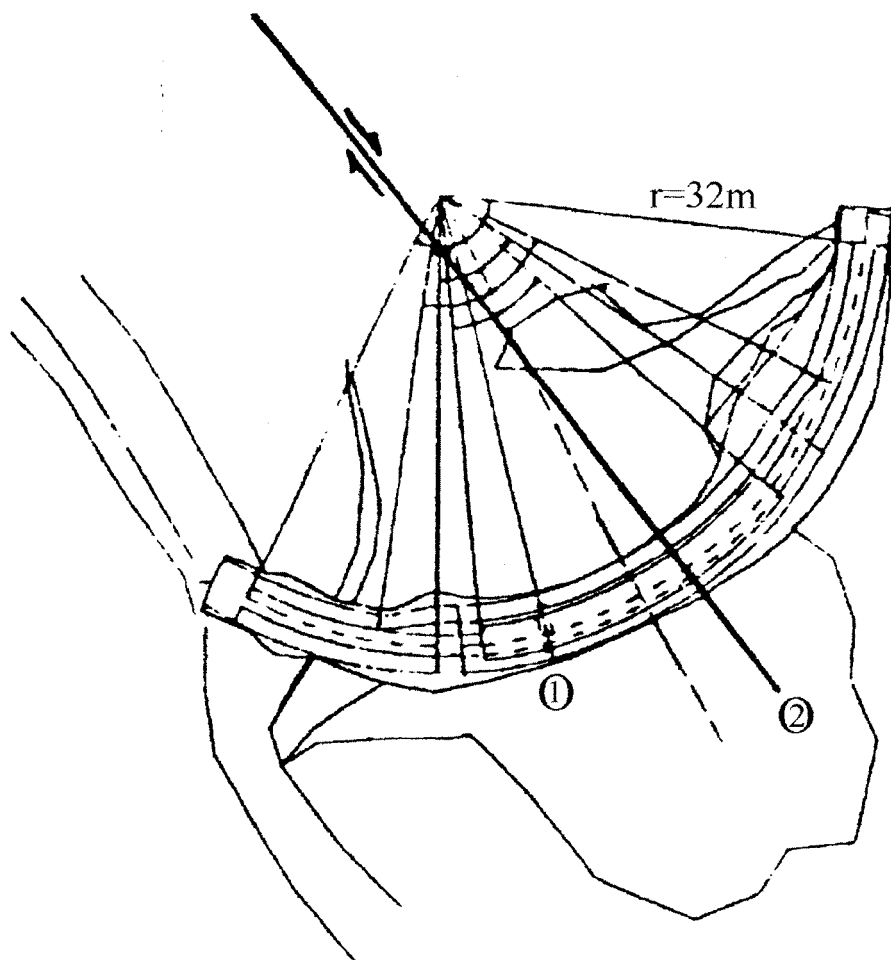
9.9. LIPOVICA DAM (YUGOSLAVIA)

The Tara mountain region mentioned while describing the Bajina Basta Dam case history is instrumentally confirmed as exhibiting contemporaneous tectonic activity : moderate seismicity and rather expressed crustal mobility.

On the Tara mountain plateau a small arch dam (17 m high) was built some ten years ago. It serves as a collector of water from the local watershed for the nearby pumped storage reservoir. It is a thin concrete arch dam, with conservative stresses (mainly due to its relatively small height). The only feature singling it out was the presence of a fault, crossing the dam near mid span. It was a very clear fault with a significant crushed zone ,but otherwise no signs of past and present mobility along this fault were found neither mentioned during the design preparation.

The Dam started with normal deformation picture but relatively soon the deformed shape of the arches started developing antimetric form, with observation points on the right part of the dam moving upstream. Such asymmetrical deformation is compatible with the downstream differential movement of the left abutment. Cracks corresponding to such differential movement have formed near the left abutment.

The geodetic measurements at this dam are performed twice yearly and show that the observation pillars on the left bank have a differential movement several cm (after the mentioned ten years of service) in relation to the right side observation pillars, which remain stable. So there is instrumental proof that we have a case of tectonic creep along the fault intersecting the foundation of the Lipovica arch dam. This is confirmed both by geodetic measurements and by cracks induced into the dam body.



Les analyses ont montré que la réserve de résistance de ce barrage était encore considérable. D'autre part, son potentiel de désastre est virtuellement nul, le volume de la retenue étant faible et le barrage étant situé dans une région montagneuse inhabitée.

L'orientation des analyses ultérieures nécessitées par ce barrage est assez claire : les contraintes induites par les mouvements de l'appui rive gauche seront superposées aux contraintes du barrage dues aux charges normales. Les analyses devront être faites pas à pas, au fur et à mesure du développement de la fissuration du barrage et en utilisant nécessairement une approche non linéaire. Il importera aussi d'appliquer la charge sismique de projet au cours des différentes étapes de la fissuration induite. Il en résultera que l'époque de la rupture de ce barrage pourra être estimée, en supposant que le fluage tectonique de la faille reste constant.

Les dépenses nécessaires pour de telles analyses ne sont pas compatibles avec les dimensions de ce barrage et avec l'absence virtuelle de potentiel de désastre. Aussi, pour le moment, laisse-t-on ce barrage sous surveillance constante en attendant une augmentation éventuelle d'intérêt pour les analyses mentionnées.

Fig. 7
Lipovica Dam layout [15]
Disposition générale du barrage Lipovica [15]

① Arch dam body
② Fault

① *Corps du barrage-voûte*
② *Faïlle*

Analyses have shown that the strength reserve of this dam in relation to failure is still considerable. On the other hand, the disaster potential of this dam is virtually nil, as the storage volume is negligible and the dam is located in uninhabited mountain region.

The way for further analyses concerning this dam is rather clear : the stresses induced by the differential movements of the left abutment should be superimposed on normal dam stresses under the design loads. The analyses should be performed stepwise as the actual cracking of the dam increases and necessarily using non-linear approach. It would be necessary to apply also the seismic loading at different stages of induced cracking. As a result, the failure time of this dam could be predicted, if the tectonic creep along the fault keeps constant.

The expenses needed for such analyses are hardly compatible with the importance of this dam and with virtual absence of its disaster capacity. So for the time being the dam is left under constant surveillance awaiting the possible rise of interest for the mentioned analyses.

De toute façon, il s'agit là d'un cas d'évidence nette de mobilité de la croûte terrestre sous forme de fluage le long d'une faille, causant des dégâts dans le corps du barrage et mettant clairement en danger la stabilité du barrage. Si c'était un grand barrage avec un potentiel correspondant de désastre, il s'agirait d'un problème de premier ordre nécessitant des analyses détaillées pour connaître quelle réserve de résistance est encore disponible et combien il reste de temps jusqu'à la rupture. Quant à la solution radicale dans le cas où le fluage de la faille continue sans interruption, il semble que la seule solution est de vider la retenue et de rendre le barrage inoffensif. Dans le cas de ce petit barrage, il est acceptable de continuer à le surveiller et de suivre l'évolution de la réponse du barrage aux déformations asymétriques imposées par le mouvement le long de la faille, jusqu'aux conséquences finales.

La principale conclusion à tirer de ce cas est que non seulement la rupture de faille mais aussi son fluage peuvent conduire à de lourdes conséquences, surtout dans le cas de barrages en béton.

9.10. BARRAGE MRATINJE (YUGOSLAVIE)

Le cas suivant concerne un grand barrage où l'activité contemporaine d'une faille voisine a été décelée par auscultation sismique avant et pendant la mise en eau, et suivie pendant l'exploitation du barrage. Un réseau de détecteurs sismiques, reliés par radio au poste central d'observation, a été installé à cet effet. Il s'agit du barrage-voûte Mratinje sur la rivière Piva, en Yougoslavie, d'une hauteur de 220 m, fondé sur des calcaires massifs Triasiques, de bonne qualité mécanique.

Le système de failles et de ruptures, affectant la région du barrage, est très développé. Le site du barrage n'est traversé par aucune faille importante, mais une faille régionale apparente passe à une distance d'environ un km de l'appui rive droite du barrage.

Parmi tous les barrages de Yougoslavie, ce barrage dispose du dossier le mieux documenté sur l'activité sismique avant et après mise en eau. Les observations sismiques ont commencé 3 ans 1/2 avant la mise en eau et se sont poursuivies jusqu'à ce jour.

Depuis 1972, un sismographe, à période courte et à trois composantes, installé près de l'appui rive droite du barrage a été exploité pendant 20 ans environ. Le sismographe est toujours opérationnel, mais maintenant les observations s'appuient sur un système plus efficace de détecteurs reliés par radio. À partir de 1982, un groupe de trois stations de mesures sismiques, à période courte, a été installé et relié par radio au centre d'acquisition de données, de sorte que la fiabilité de détermination des épicentres a été considérablement augmentée. Pour l'orientation des études, les résultats obtenus par la première station à trois composantes étaient très importants. Bien que la détermination des emplacements des événements sismiques avec une seule station à trois composantes ne soit pas très précise, on a noté un certain groupement des épicentres le long des lignes tectoniques principales et spécialement le long de la faille maîtresse passant à l'arrière-plan de l'appui rive droite. Ainsi, la possibilité d'activité de cette faille était fortement indiquée lors des observations précédant la mise en eau et confirmée durant l'exploitation de la retenue, en utilisant les trois sismographes intégrés dans un réseau régional interconnecté par radio [16].

Anyhow it is a case of important evidence showing the crustal mobility at work in the form of fault creep, inducing damages in the dam body and clearly threatening the eventual dam stability. If it were a large dam with corresponding disaster capability it would have been a first order problem needing detailed analyses as to how much strength reserve is left and how much time is available prior to failure. As for the radical solution in case the fault creep continues indefinitely, there appears to be none, except to empty the dam and make it inoffensive. In the case of this small dam it is acceptable to keep monitoring it and to follow the evolution of the dam response to the imposed asymmetrical deformations due to the fault movement, to its final consequences.

The main conclusion to reach from this case is that not only fault breaking but also fault creep could lead to heavy consequences, especially in case of concrete dams.

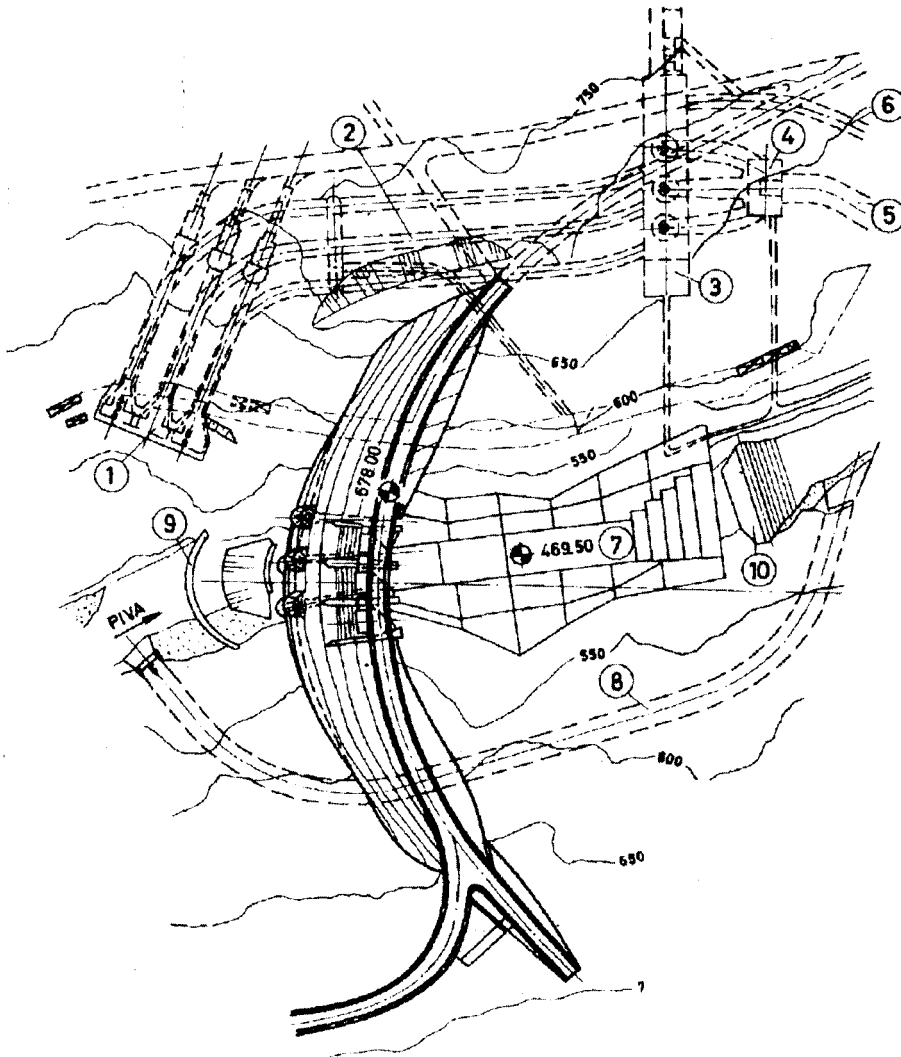
9.10. MRATINJE DAM (YUGOSLAVIA)

A case history of a large dam where the fault activity was determined during preimpounding seismic monitoring and followed during the dam service by a modern radio-linked network of sensors, is the case of the Mratinje Dam on the Piva river in Yugoslavia. It is a 220 m high arch dam built in mechanically very competent limestones.

The system of faults and ruptures affecting the dam region is quite developed. The site itself is not intersected by any significant fault but a large and regionally conspicuous fault is passing in the background of the right dam abutment at a distance of app. one km.

This dam has the best documented record of preimpounding and postimpounding activity of all dams in Yugoslavia. The seismic monitoring was operative at the dam site during 3.5 years prior to impounding, continuing afterwards to present date.

From 1972 one three component short period seismograph was placed near the right dam abutment and was operative for about 20 years, factually is operative even today but now the monitoring is relying on a more capable set of radio-linked sensors. From 1982, such a set of three short period seismic stations was introduced and radio-linked to the central acquisition station so that the reliability of epicentres determination was substantially increased. But from the viewpoint of designers orientation the role of the results supplied by the first three-component short period station was important. Although the precision of seismic events locations with one three-component station is not satisfactory, clustering trends were noted along the main tectonic lines and, of especial importance, along the mentioned fault passing in the background of the right dam abutment. So the possibility of its being an active fault was strongly indicated during preimpounding stage and confirmed during later monitoring, using a three stations seismographs array, integrated into a larger radio linked regional network [16].



La mise en eau du barrage Mratinje a provoqué une activité sismique induite importante avec une très forte augmentation du nombre de secousses et de leurs magnitudes, le maximum d'activité ayant eu lieu en mai 1978 avec une secousse de magnitude 4,1. Presque tous les hypocentres étaient peu profonds. La secousse la plus forte a suivi une opération rapide de vidange et de remplissage de la retenue, et fut accompagnée de perturbations en surface et de glissements modérés le long de la faille principale. Dans les années suivantes, l'activité sismique est redévenue celle existant auparavant et la sismicité induite a été considérée comme terminée, comme cela est constaté dans la plupart des cas enregistrés. Mais, en 1994, une opération encore plus rapide de vidange et de remplissage a été rendue nécessaire par la

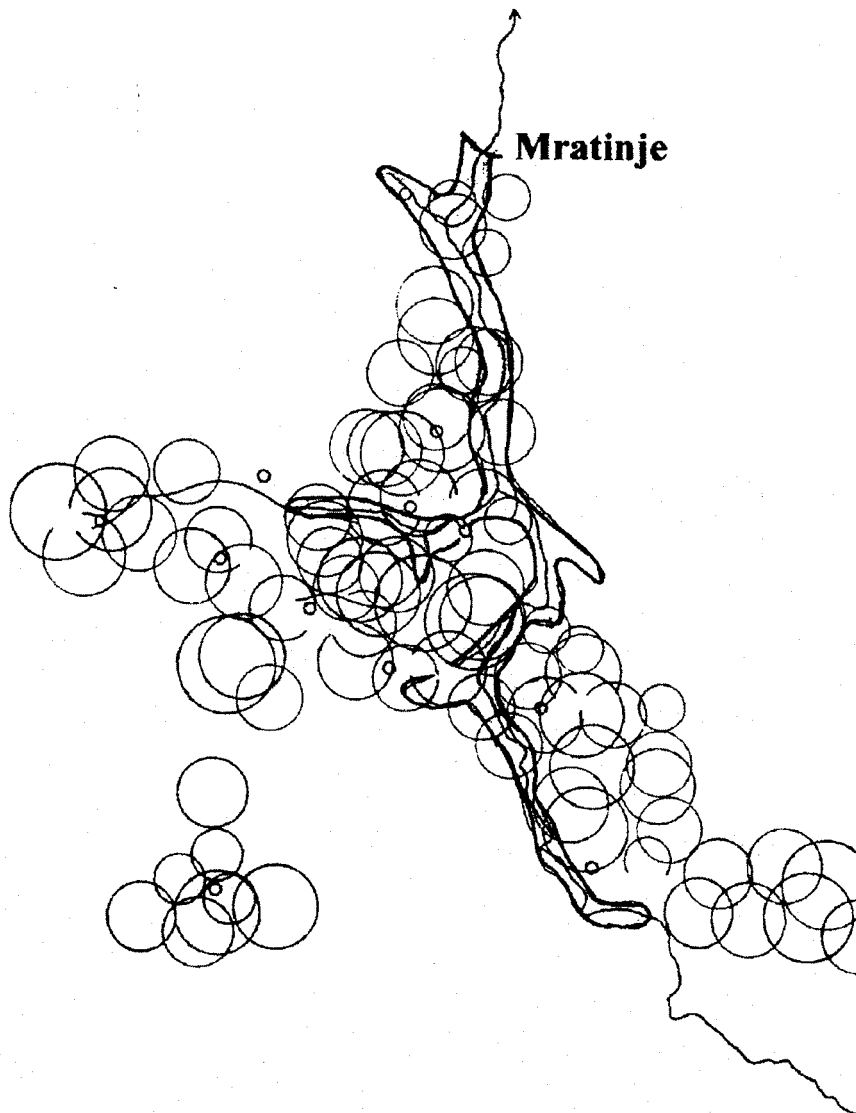
Fig. 8

Layout of Mratinje Dam [15]

Disposition générale du barrage Mratinje [15]

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| ① Intake structure | ① <i>Ouvrage de prise d'eau</i> |
| ② Headrace tunnel | ② <i>Galerie d'aménée</i> |
| ③ Power house | ③ <i>Salle des machines</i> |
| ④ Surge tank | ④ <i>Cheminée d'équilibre</i> |
| ⑤ Tailrace tunnel | ⑤ <i>Galerie de fuite</i> |
| ⑥ Access tunnel | ⑥ <i>Galerie d'accès</i> |
| ⑦ Stilling basin | ⑦ <i>Bassin de dissipation</i> |
| ⑧ Diversion tunnel | ⑧ <i>Galerie de dérivation</i> |
| ⑨ Upstream cofferdam | ⑨ <i>Batardeau amont</i> |
| ⑩ Downstream cofferdam | ⑩ <i>Batardeau aval</i> |

In general, the Mratinje storage caused intensive induced seismic activity with sharp increase of the number of shocks and of their magnitudes, peaking in May 1978 with a 4.1 magnitude event. Nearly all of monitored hypocenters were quite shallow. The highest monitored shock followed a quick emptying and refilling of the reservoir and was accompanied by surface disturbances and moderate landsliding along the main fault line. During later years the seismic activity shifted towards earlier background activity and the induced activity was considered exhausted like in most of the cases on record. But in 1994 even sharper emptying and subsequent refilling of the storage was dictated by power system requirements and the induced phenomena were again strongly manifested, peaking with 3.8 magnitude shock in



situation énergétique et les phénomènes de sismicité induite se sont de nouveau fortement manifestés, avec une secousse maximale de magnitude 3,8 en mai 1994. Des perturbations sont de nouveau apparues en surface, suivant généralement les mêmes traces que celles de 1978.

Le barrage de Mratinje n'a pas été affecté par les phénomènes observés. Comme les foyers des secousses groupés le long de la faille principale étaient de nouveau très peu profonds, on se trouvait en présence de perturbations de surface identiques à celles observées pendant l'épisode d'activité induite maximale de 1978, et correspondant à une même variation exceptionnelle du niveau de la retenue. Cette corrélation est très nette, les enregistrements pendant les deux événements étant tout à fait fiables.

Fig. 9
Epicentral map for the peaking period of induced seismicity [9]
Magnitudes up to $M = 4.1$
Carte des épicentres correspondant à la période de pointe de sismicité induite [9]
Magnitudes jusqu'à $M = 4,1$

May 1994. The surface phenomena appeared again following generally the same traces having been active in 1978.

The Mratinje Dam was unaffected by the monitored phenomena. As the foci of shocks grouped along the main fault line were again very shallow we are facing the same kind of surface disturbance as with 1978 peaking episode of induced activity following similar extreme manipulation with storage levels. This correlation is quite neat and reliably recorded during both events.

L'observation détaillée de l'activité sismique au barrage Mratinje continue et est une composante constante du système d'auscultation du barrage.

Quatre conclusions peuvent être tirées de cet exemple :

- Des perturbations de surface le long des lignes de failles sont possibles quand les foyers générateurs sont très peu profonds (comme c'était le cas durant l'activité induite par les variations de niveau de la retenue Mratinje).

- L'activité sismique induite peut être régénérée sous l'effet de variations extrêmes du niveau de la retenue. Cela est contraire à l'opinion avançant qu'après la pointe des phénomènes induits le retour à l'activité de fond antérieur est définitif, du moins pendant la vie du barrage. Le cas du barrage Mratinje montre que ce n'est pas une règle générale et que la situation observée est assez logique compte tenu du mécanisme de tels phénomènes.

- L'auscultation sismique au moyen de réseaux locaux, outre la détection et l'enregistrement des phénomènes induits, peut en même temps enregistrer l'activité sismique le long de certaines lignes de failles et indiquer si elles passent par le site du barrage.

- Dans les régions où l'on prévoit la construction de barrages, les systèmes régionaux d'auscultation sismique couvrant plusieurs sites possibles peuvent être utiles pour la détection de l'activité le long des lignes de failles. De telles données peuvent être utilisées dans les études préliminaires pour indiquer les failles susceptibles d'activité contemporaine.

9.11. BARRAGE TARBELA (PAKISTAN)

Le barrage Tarbela, de 143 m de hauteur (achevé en 1974), sur le fleuve Indus au Pakistan, est un bon exemple pour montrer l'importance des études de failles actives. Le barrage a été projeté sans prendre en considération une faille traversant la fondation du barrage, cette faille ayant été découverte pendant les travaux de construction (la faille Darband). L'étude séismotectonique détaillée, faite lors d'une étape ultérieure, a prouvé que la faille était active. Le réseau installé pour l'auscultation de la sismicité induite par le réservoir a confirmé aussi l'activité sismique de cette faille. Les paramètres sismiques du projet ont été révisés, en prenant en considération la faille active passant au-dessous du corps de barrage. Les effets de la rupture en surface de la faille Darband, sous le remblai, ont été également considérés. On a estimé qu'un mouvement de 1 m à 1,5 m pouvait survenir sur cette faille. On a estimé qu'un tel mouvement sur la faille Darband ne causerait pas une rupture catastrophique du remblai du barrage, car le noyau d'étanchéité est constitué de matériaux auto-colmatants, avec une zone de transition et un large drain cheminée à l'aval. Les calculs dynamiques basés sur les paramètres sismiques révisés ont montré que la sécurité du barrage était satisfaisante, mais qu'un certain renforcement d'autres ouvrages était nécessaire.

Les conclusions importantes qu'on peut tirer du cas du barrage Tarbela sont les suivantes :

- Une étude appropriée des failles et de la séismotectonique de la région d'un site de barrage doit être entreprise au stade du projet.

The detailed monitoring of the seismic activity at Mratinje Dam is continuing as a constant feature of the dam observation system.

Four conclusions are stemming out from this case history :

- that surface disturbances along fault lines are possible when the generating foci are very shallow (as was the case during induced activity caused by Mratinje storage fluctuations).

- that the induced seismic activity can be rejuvenated after extreme fluctuations of the storage levels, contrary to the opinion that after peaking of the induced phenomena the fading to background is final, at least for the time span of the dam life. The Mratinje experience shows that it is not a general rule and this is rather logical, considering the mechanism of such phenomena.

- that seismic monitoring using micronetworks, apart from serving to detect and record induced phenomena, might be recording at the same time the seismic activity along some fault lines and indicate whether such activated fault lines cross the dam site.

- in regions where dam building is foreseen, the regional monitoring systems covering a number of prospective sites might be useful in documenting the activity along the fault lines. Such data might be used in preliminary studies, singling out faults susceptible of contemporaneous activity.

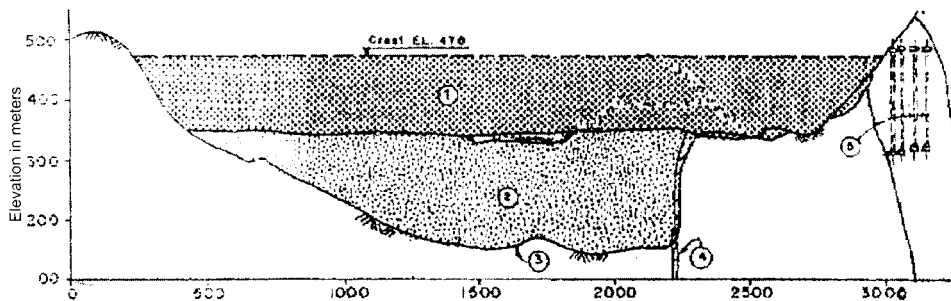
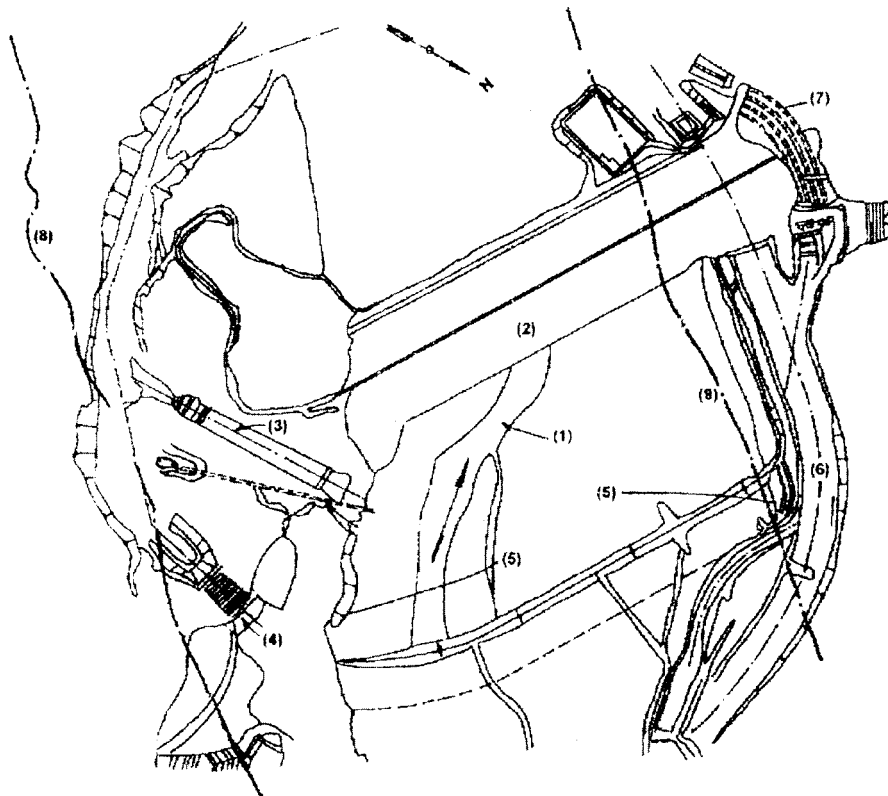
9.11. TARBELA DAM (PAKISTAN)

The 143 meters high Tarbela Dam (completed in 1974), built on river Indus in Pakistan, is a good example of significance of active faults studies. The dam was designed without consideration to a fault (Darband fault) crossing the dam foundation which was revealed during the construction stage. A detailed seismotectonic study at later stage proved the fault to be active. The seismic network established for monitoring of reservoir induced seismicity also confirmed the seismic activity of this fault. The seismic design parameters had to be revised by taking into consideration the active fault passing below the dam body. The effect of surface rupture on Darband fault beneath the embankment was also reviewed. It was estimated that movement of 1 m to 1.5 m could occur on this fault. It was believed that if such a movement did occur on the Darband fault no catastrophic failure of the embankment would result, since the core of the embankment is constructed of self-healing material with a transition zone and a wide chimney drain on the downstream. Dynamic analyses carried out with revised seismic parameters revealed that the dam itself is safe, but some strengthening of other structures would be required.

The important conclusions drawn from Tarbela Dam example are:

- A proper study of faults and seismotectonics of the dam site region should be taken up during the design stage.

- Le réseau d'auscultation sismique doit être établi bien avant la construction car il peut détecter une activité sismique le long de failles traversant le site du barrage ou ses environs.
- Les enregistrements sismiques peuvent être comparés avec les changements de la sismicité du site du barrage après la mise en eau, pour évaluer la sismicité induite.



- The seismic network should be established well before the construction as it may be able to detect the seismic activity along faults crossing the dam site or in its vicinity.

- The seismic record may be compared with the changes in the seismicity of the dam site after impounding to evaluate induced seismicity.

Fig. 10

Tarbela Dam general layout plan [22]

Vue en plan générale du barrage Tarbela [22]

- | | |
|-------------------------|--|
| (1) Indus River | (1) <i>Fleuve Indus</i> |
| (2) Main embankment dam | (2) <i>Barrage principal en remblai</i> |
| (3) Service spillway | (3) <i>Évacuateur de crue de service</i> |
| (4) Auxiliary spillway | (4) <i>Évacuateur de crue auxiliaire</i> |
| (5) Impervious blanket | (5) <i>Tapis étanche</i> |
| (6) Diversion channel | (6) <i>Canal de dérivation</i> |
| (7) Power tunnels | (7) <i>Galeries d'aménée d'eau à l'usine</i> |
| (8) Dal Darra Fault | (8) <i>Faille Dal Darra</i> |
| (9) Darband Fault | (9) <i>Faille Darband</i> |

Fig. 11

Deep alluvial filled valley at Tarbela Dam [22]

Vallée alluviale profonde au barrage Tarbela [22]

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| ① Embankment fill | ① <i>Remblai</i> |
| ② Alluvial deposits | ② <i>Dépôt alluvial</i> |
| ③ Top of bedrock | ③ <i>Surface du rocher</i> |
| ④ Fault | ④ <i>Faille</i> |
| ⑤ Tunnels and gate shafts | ⑤ <i>Galeries et puits des vannes</i> |

9.12. MATAHINA DAM (NEW ZEALAND)

The Matahina Dam in New Zealand is a rockfill embankment 80 m high, with a central core [21].

This dam has leaked after first filling in 1967 due to core cracking, and was consequently repaired. In 1987 the dam was exposed to strong seismic shaking (peak horizontal crest acceleration 0.42 g) due to (M_s) 6.3 earthquake, located at the Edgcombe fault. Significant rehabilitation work was performed in 1988 due to serious core erosion.

Fig. 12

Cross section of Matahina Dam, according to original design [21]

Coupe transversale du barrage Matahina, selon le projet initial [21]

- | | |
|---------------------|---------------------------------------|
| ① Rockfill shoulder | ① <i>Recharges en enrochement</i> |
| ② Outer transitions | ② <i>Zones de transition externes</i> |
| ③ Inner transitions | ③ <i>Zones de transition internes</i> |
| ④ Core | ④ <i>Noyau</i> |
| ⑤ Cutoff | ⑤ <i>Coupure étanche</i> |
| ⑥ Drainage curtain | ⑥ <i>Rideau de drainage</i> |
| ⑦ Drainage blanket | ⑧ <i>Tapis de drainage</i> |

The dam is sited across the Waiohau fault, 80 km long. The fault is active with proven surface fault breaking during the Holocene.

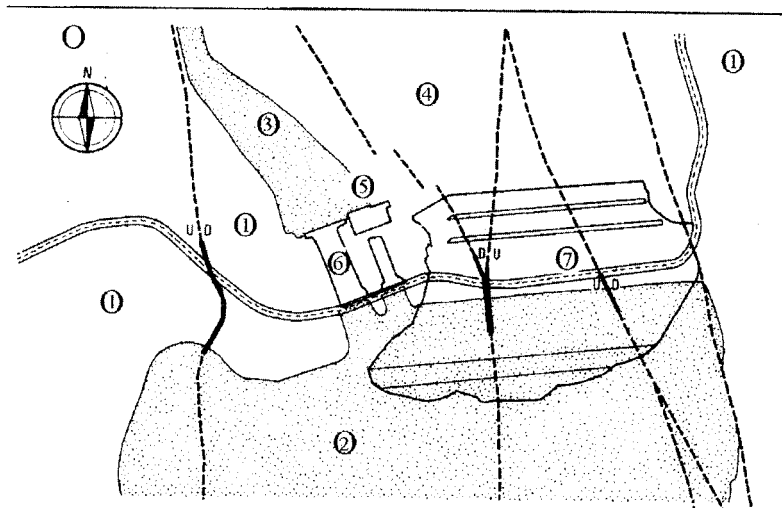
Fig. 13

Waiohau fault location in relation to the Matahina Dam site [21]

Situation de la faille Waiohau par rapport au site du barrage Matahina [21]

- | | |
|-----------------------------------|--|
| ① Normal faults of the Taupa belt | ① <i>Failles normales de la ceinture Taupa</i> |
| ② Matahina Dam | ② <i>Barrage Matahina</i> |
| ③ Waiohau Fault | ③ <i>Faille Waiohau</i> |
| ④ Rangitaiki River | ④ <i>Rivière Rangitaiki</i> |
| ⑤ North Island shear belt | ⑤ <i>Ceinture des failles North Island</i> |

Several prominent strands of the Waiohau fault intersect the dam site (Fig. 14) and are considered capable of the fault rupture during the lifetime of the Matahina Dam.



Pour évaluer la sécurité du barrage, on a choisi un séisme de magnitude $M_w = 7,2$ [21], considérant qu'il provoquerait une rupture en surface de la faille Waiohau traversant le site du barrage. La période de retour d'un tel événement (basée sur des reconnaissances de la faille au moyen de tranchées, sur des données de taux de glissement et sur des modèles de récurrence) fut estimée à 5 000 ans.

L'estimation du déplacement de la faille fut basée sur le rapport de Wells et Coppersmith [20], en effectuant également des comparaisons avec les déplacements observés lors de ruptures en surface de failles en Nouvelle-Zélande et en tenant compte des données paléosismiques fournies par les reconnaissances sur le terrain. La valeur de 3,0 m en glissement oblique fut ainsi choisie pour le déplacement de la faille en surface, le rapport des composantes horizontale et verticale de ce déplacement étant estimé à 2 : 1 (i.e. 2,7 m de déplacement horizontal et 1,3 m de déplacement vertical).

De tels déplacements doivent conduire sans aucun doute à une importante fissuration du corps du barrage, causant des renards et une érosion interne (comme mis en évidence par l'érosion du noyau observée pendant le tremblement de terre Edgumbe, en 1987).

On a donc décidé de renforcer le barrage, en satisfaisant aux critères principaux suivants :

- Le barrage renforcé doit résister au Séisme d'Évaluation de Sécurité sans qu'il y ait des lâchures d'eau non contrôlées de la retenue (SES de magnitude $M_w = 7,2$ sur la faille Waiohau).
- Une capacité de déversement après l'événement SES doit être prévue dans le cas où le débit de la rivière ne peut être évacué par l'usine, les vidanges de fond et l'évacuateur de crue.
- Pendant le renforcement, la sûreté d'exploitation de la retenue – y compris le passage des crues – doit être assurée.

Le renforcement proposé est indiqué sur la Fig. 15.

Fig. 14

Location of the Waiohau fault strands on the Matahina Dam site [21]
Situation des branches de la faille Waiohau sur le site du barrage Matahina [21]

- | | |
|----------------------------|--|
| ① Matahina ignimbrite | ① <i>Ignimbrite de Matahina</i> |
| ② Matahina reservoir | ② <i>Retenue Matahina</i> |
| ③ Rangitaiki River | ③ <i>Rivière Rangitaiki</i> |
| ④ Late Quaternary alluvium | ④ <i>Alluvions du Quaternaire récent</i> |
| ⑤ Powerhouse | ⑤ <i>Usine hydroélectrique</i> |
| ⑥ Spillway | ⑥ <i>Évacuateur de crue</i> |
| ⑦ Embankment dam | ⑦ <i>Barrage en enrochement</i> |

For dam safety evaluation, an earthquake with moment magnitude $M_w = 7.2$ was selected [21], considering that it would cause the surface rupture of the Waiohau fault, crossing the dam site. The return period of such an event (based on fault trenching data, slip rate data and recurrence models) was estimated as 5 000 years.

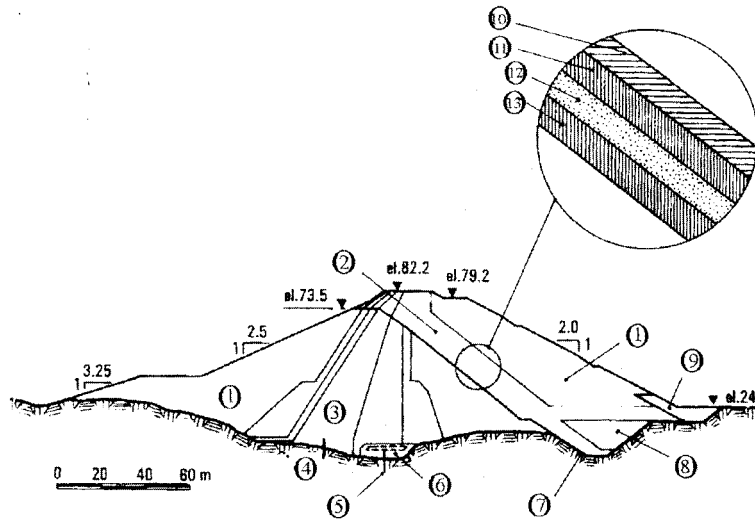
The estimate of the fault displacement was based on Wells and Coppersmith [20] paper, introducing also comparisons with fault surface displacements in New Zealand and the paleoseismic data obtained by field investigations. The value of 3.0 m in oblique slip was thus selected for the fault surface displacements, estimating the ratio of horizontal to vertical component of this displacement as 2:1 (i.e. 2.7 m horizontal and 1.3 m vertical displacement).

Such displacements would surely result in major cracking of the dam body inducing piping and internal erosion (as evidenced by observed core erosion during the 1987 Edgecumbe earthquake).

It was therefore decided to strengthen the dam structure, satisfying the following main criteria :

- The strengthened dam should withstand the Safety Evaluation Earthquake without uncontrolled releases from the reservoir (SEE being $M_w = 7.2$ on the Waiohau fault).
- Post SEE overspill capacity must be provided in case the river flow cannot be passed through the powerplant, the outlets and the spillway.
- During strengthening the reservoir should be safely operated, including flood passage.

The proposed strengthening is outlined in Fig. 15.



La conception du renforcement est d'excaver une partie importante de la recharge aval (en abaissant également de manière temporaire la crête du barrage) et de maintenir en général le noyau existant. La maîtrise des percolations après l'événement SES doit être assurée en plaçant une large zone de matériaux de filtre, de transition et de drainage, supportée par une zone d'enrochement adéquate. La largeur horizontale minimale de la zone protectrice filtrante et drainante est de 5,0 m. La nouvelle largeur de la crête du barrage sera de 40 m environ, la crête étant surélevée de 3,0 m pour absorber les tassements possibles dus aux secousses et maintenir une revanche suffisante.

Ce renforcement nécessitera un volume de $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'excavation et de remblai (le volume initial du remblai étant de $5,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

Le renforcement décrit est conçu pour assurer la sûreté d'exploitation de la retenue Matahina vis-à-vis d'un séisme de magnitude 7.2 et d'une rupture de faille dans les fondations du barrage avec un déplacement maximal de 3,0 m.

L'achèvement des travaux de renforcement est prévu en 1998.

Fig. 15

Cross section of Matahina Dam as it will be after the strengthening measures [21]

Coupe transversale du barrage Matahina après le renforcement [21]

- | | |
|-----------------------------|---|
| ① Rockfill shoulder | ① <i>Recharges en enrochement</i> |
| ② Filter and drainage zones | ② <i>Zones filtrantes et drainantes</i> |
| ③ Core | ③ <i>Noyau</i> |
| ④ Cutoff | ④ <i>Coupure étanche</i> |
| ⑤ Drainage curtain | ⑤ <i>Rideau de drainage</i> |
| ⑥ Drainage blanket | ⑥ <i>Tapis de drainage</i> |
| ⑦ Excavation profile | ⑦ <i>Profil d'excavation</i> |
| ⑧ Alluvial backfill | ⑧ <i>Remblai alluvionnaire</i> |
| ⑨ Large rockfill | ⑨ <i>Gros enrochement</i> |
| ⑩ Coarse transition-drain | ⑩ <i>Zone de transition grossière-drain</i> |
| ⑪ Fine transition | ⑪ <i>Zone de transition fine</i> |
| ⑫ Filter | ⑫ <i>Filtre</i> |
| ⑬ Fine transition | ⑬ <i>Zone de transition fine</i> |

The strengthening concept is to excavate significant part of the downstream shoulder (lowering also temporarily the crest of the dam) and keeping generally the existing core. The post SEE leakage control is to be ensured by placing a wide zone of filter, transition and drainage materials, supporting it by an adequate rockfill buttress. The minimum horizontal width of the protective filter and drainage zone is 5.0 m. The new crest width will be approximately 40 m with the crest being heightened by 3.0 m so as to accommodate any settlement due to shaking and maintain sufficient freeboard.

This strengthening will require $1.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of excavation and replacement (the original volume of the embankment being $5.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

The described strengthening is designed to ensure the safe operation of the Matahina reservoir when facing a seismic event of 7.2 magnitude and a fault break in the foundation with 3.0 m maximum displacement.

The strengthening works are expected to be completed in 1998.

10. REFERENCES

- [1] Earthquake Engineering;
L. Wiegel, Coordinating Editor; Prentice Hall Inc. (1970).
- [2] Global Tectonics and Earthquake Risk;
C. Lomnitz; Developments in Geotectonics 5; Elsevier (1974).
- [3] Potentially Active Faults in Dam Foundations;
J. L. Sherrard, C. R. Allen, L. S. Cluff; Geotechnique 24 (1974).
- [4] Review and Appraisal of Case Histories Related to Seismic Effects of Reservoir Impounding;
A. Bozovic; Engineering Geology 8 (1974).
- [5] Dams and Earthquakes;
H. K. Gupta and B. K. Rastogi; Elsevier (1976).
- [6] Seismic Risk and Engineering Decision;
C. Lomnitz and E. Rosenblueth, Editors (1976); Elsevier, Development in Geotechnical Engineering.
- [7] Evaluation of the Earthquake Stability of Lower Crystal Springs Dam;
J. G. Wulff and R. C. Van Orden; Q.51-R.1, 13th International Congress on Large Dams, New Delhi (1979).
- [8] Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting - A Safety Guide; International Atomic Energy Agency, Vienna (1979).
- [9] Seismological Institute of Montenegro;
Documentation on Seismic Monitoring of Mratinje Dam; Reports 1974 to 1982.
- [10] Induced Seismicity;
A. Bozovic; Rock Mechanics Association, Zagreb (1983).
- [11] Design of Hydraulic Structure;
A. Bozovic (1987); Colorado State University International Symposium.
- [12] Tectonic Structures of Foundations of Large Concrete Dams;
I. A. Pirogov; Energoatomizdat, Moscow (1987).
- [13] International Workshop on Arch Dams, Coimbra (1987);
J. L. Serafim and R. W. Clough, Editors.
- [14] Recent Crustal Movements; Seminar, Neubiberg (1989);
N. Kersting and W. Welsh, Editors.
- [15] Documentation on Bajina Basta, Mratinje and Lipovica Dams;
Energoprojekt Consultants, Beograd.
- [16] Digital Seismic Data Acquisition and Processing Using Montenegro Seismic Telemetry Network;
B. Glavatovic, Seismical Observatory of Montenegro, Podgorica, Yugoslavia; Symposium Organized by the European Center for Geodynamics and Seismology, Luxemburg (1992).

- [17] Clyde Dam Slip Joint;
J. W. Hatton (New Zealand); Vol. V, Q.66-7, Seventeenth International Congress on Large Dams, Vienna (1991).
- [18] Selecting Seismic Parameters for Large Dams-Guidelines;
ICOLD Bulletin 72 (1989).
- [19] Angewandte Geowissenschaften, Band I & II;
F. Bender et al.; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart (1981-1985).
- [20] New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement;
D. L. Wells and K. J. Coppersmith; Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002 (August 1984).
- [21] Design Criteria for Fault Rupture at the Matahina Dam, New Zealand;
M. D. Gillon, L. H. Meija, S. T. Freeman, K. R. Berryman; The International Journal on Hydropower and Dams, Volume Four, Issue Two (1997).
- [22] Tarbela Dam Case;
Information from Pakistan National Committee on Large Dams (1997).
- [23] The Geodetic and Photogrammetric Deformation Measurements on Dams;
Swiss National Committee on Large Dams; Report distributed at ICOLD Congress in Florence (1997).

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : septembre 1998
N° 19109
ISSN 0534-8293

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

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



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