

RESERVOIRS AND SEISMICITY

State of knowledge

RETENUES ET SISMICITÉ

État des connaissances

Bulletin 137



2011

Cover/Couverture :

The cover illustration shows the Khao Laem Dam in Thailand (now called Vajiralongkorn Dam)/

L'illustration en couverture représente le Barrage de Khao Laem (Thaïlande), maintenant appelé Barrage de Vajiralongkorn

AVERTISSEMENT – EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ :

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.

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 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.

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.

Original text in English
French translation by Christian Guillaud (Canada)
Layout by Nathalie Schauner

*Texte original en anglais
Traduction en français par Christian Guillaud (Canada)
Mise en page par Nathalie Schauner*

RESERVOIRS AND SEISMICITY

State of knowledge

RETENUES ET SISMICITÉ

État des connaissances

Commission Internationale des Grands Barrages - 61, avenue Kléber, 75116 Paris
Tél. : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 18 22
E-mail : secretaire.general@icold-cigb.org
Site : www.icold-cigb.net

COMMITTEE ON SEISMIC ASPECTS OF DAM DESIGN

COMITÉ SUR LES ASPECTS SISMQUES DES PROJETS DE BARRAGES
(2004)

Chairman/Président

Switzerland /Suisse

M. WIELAND

Vice Chairman/Vice Président

China /Chine

H. CHEN

Japan /Japon

N. MATSUMOTO

Secretary/Secrétaire

France

M. LINO

Members/Membres

Algeria/Algérie

K. BENSEGHIER

Argentina/Argentine

J. CARMONA

Australia/Australie

I. LANDON-JONES

Austria/Autriche

G. ZENZ

Canada

B. FAN

Chile/Chili

G. NOGUERA

Costa Rica

A. CLIMENT

Egypt/Égypte

A. M. SHALABY

Germany/Allemagne

C. KOENKE

India/Inde

M. GOPALAKRISHNAN

Iran

A. MAHDAVIAN

Italy/Italie

A. CASTOLDI

Korea/Corée

Y. S. CHOI

Former Yug. Rep. of Macedonia/

Ex. Rép. Youg. de Macédoine

V. MIHAILOV

Mexico/Mexique

M. ROMO

Norway/Norvège

K. HOEG

Pakistan

G. M. ILYAS

Portugal

P. S. SECO E PINTO

Russia/Russie

A. N. MARCHUK

Serbia/Serbie

A. BOZOVIC

Thailand/Thaïlande

T. HARNPATTANAPANICH

United Kingdom/Royaume-Uni

J. L. HINKS

United States/États-Unis

J. L. EHASZ

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. PHÉNOMÈNES RELATIFS A LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE (RTS) ET DÉVELOPPEMENT DE LEUR ÉVALUATION ET INTERPRÉTATION
3. OCCURRENCE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR LA RETENUE DE BARRAGE
4. CARACTERISTIQUES DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE
5. MÉCANISME DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE ET RHÉOLOGIE DES MATERIAUX DE LA CROUTE TERRESTRE
6. TEMPS DE DIFFUSION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE
7. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES RTS
8. EFFETS DU REMPLISSAGE DES RETENUES
9. ANALYSE DE CAS
10. ÉVALUATION DU POTENTIEL ET CONTRÔLE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE
11. CONSIDÉRATIONS FINALES
12. RÉFÉRENCES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
 2. RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY PHENOMENA AND DEVELOPMENT OF THEIR EVALUATION AND INTERPRETATION
 3. FREQUENCY OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY
 4. CHARACTERISTICS OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY
 5. MECHANISM OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY AND RHEOLOGY OF EARTH CRUST MATERIALS
 6. PORE PRESSURES DIFFUSION TIME
 7. GENERAL STATEMENT ON UNDERSTANDING RTS PHENOMENA
 8. EFFECTS OF RESERVOIR IMPOUNDING
 9. CASE HISTORIES
 10. ASSESSING THE POTENTIAL AND MONITORING THE RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY
 11. CLOSING CONSIDERATIONS
 12. REFERENCES
-

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. INTRODUCTION	12
2. PHÉNOMÈNES RELATIFS À LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE (RTS) ET DÉVELOPPEMENT DE LEUR ÉVALUATION ET INTERPRÉTATION	14
3. OCCURRENCE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR LA RETENUE DE BARRAGE	20
4. CARACTÉRISTIQUES DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE	26
5. MÉCANISME DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE ET RHÉOLOGIE DES MATÉRIAUX DE LA CROUTE TERRESTRE	30
6. TEMPS DE DIFFUSION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE.....	50
7. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES RTS	52
8. GESTION DES RISQUES	54
9. ANALYSE DE CAS	60
9.1. Cas du barrage de Hsingfengkiang	60
9.2. Cas du barrage de Mratinje.....	72
9.3. Cas du barrage de Kurobe	82
9.4. Cas du barrage de Takase	90
9.5. Cas du barrage de Poechos	94
10. ÉVALUATION DU POTENTIEL ET CONTRÔLE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE.....	100
11. CONSIDÉRATIONS FINALES.....	104
12. RÉFÉRENCES	108

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD.....	11
1. INTRODUCTION	13
2. RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY PHENOMENA AND DEVELOPMENT OF THEIR EVALUATION AND INTERPRETATION ..	15
3. FREQUENCY OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY.....	21
4. CHARACTERISTICS OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY...	27
5. MECHANISM OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY AND RHEOLOGY OF EARTH CRUST MATERIALS.....	31
6. PORE PRESSURES DIFFUSION TIME	51
7. GENERAL STATEMENT ON UNDERSTANDING RTS PHENOMENA	53
8. RISK MANAGEMENT	55
9. CASE HISTORIES	61
9.1. Hsingfengkiang Dam Case History.....	61
9.2. Mratinje Dam Case History.....	73
9.3. Kurobe Dam Case History.....	83
9.4. Takase Dam Case History	91
9.5. Poechos Dam Case History	95
10. ASSESSING THE POTENTIAL AND MONITORING THE RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY.....	101
11. CLOSING CONSIDERATIONS.....	105
12. REFERENCES	108

TABLEAUX /FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1	Liste des cas de RTC fréquemment cités (USSD, 1997)	22
Tableau 2	Activité RTS au barrage de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Podgorica)	76

FIGURES

Fig. 1	Graphique des cas de RTS (USSD,1997).....	24
Fig. 2	Représentation qualitative des propriétés rhéologiques dans la zone sismogénique de la croûte rocheuse (Nikolayevskiy, 1982).....	32
Fig. 3	Modèle de comportement généralisé de la roche sous compression confinée pour des conditions similaires à la croûte terrestre (selon Brace, 1974).....	36
Fig. 4	Comportement de frottement en fonction de la pression et de la température (selon Brace 1974 et Brace and Byerlee 1970).....	38
Fig. 5	Frottement dans le grès sous des pressions interstitielles variables (selon Brace 1974; reproduit de Byerlee 1966).....	38
Fig. 6	Effet de la température sur la fracturation et le frottement du granite pour une contrainte normale de 4 kbar (selon Brace, 1974; reproduit de Stesky <i>et al.</i> , 1974).....	40
Fig. 7	Relation « dépendance du glissement » pour une rupture par cisaillement.....	42
Fig. 8	Représentation schématique du processus cyclique d'un tremblement de terre (Ohnaka, 2004)	44
Fig. 9	Processus de nucléation d'une rupture d'une faille par cisaillement (Ohnaka, 2004)	46
Fig. 10	Relation d'échelle entre les conditions en laboratoire et les conditions réelles.....	46
Fig. 11	Augmentation de la pression interstitielle pour différentes profondeurs en fonction du temps (D. A. Howells, 1976)	50
Fig. 12	Fluctuation du niveau d'eau de la retenue, fréquence mensuelle des secousses sismiques et émission de l'énergie sismique pour le barrage de Hsingfengkiang (Shen Shonggang <i>et al.</i> , 1973).....	62
Fig. 13	Représentation schématique du barrage de Hsingfengkiang	64
	(Hsu Tsung-Ho <i>et al.</i> , 1975)	64
Fig.14	Distribution des épïcêtres (jusqu'en 1972) dans la zone de la retenue de Hsingfengkiang	66

TABLES / FIGURES

TABLE

Table 1	List of frequently cited RTS cases (USSD, 1997).....	23
Table 2	RTS activity at Mratinje Dam (from Seismological Institute, Podgorica).....	77

FIGURES

Fig. 1	Scatter graph of RTS cases (USSD,1997).....	25
Fig. 2	Qualitative presentation of rheological properties in the seismogenic zone of the rock crust (Nikolayevskiy, 1982).....	33
Fig. 3	Generalized behaviour of rock in confined compression under crustal conditions (from Brace, 1974).....	37
Fig. 4	Frictional behavior as a function of pressure and temperature (from Brace 1974; taken from Brace and Byerlee 1970).....	39
Fig. 5	Friction in sandstone, under varying pore pressures (from Brace 1974; reproduced from Byerlee 1966).....	39
Fig. 6	Effect of temperature on fracture and friction of granite at 4 kbar normal stress (From Brace, 1974; reproduced from Stesky <i>et al.</i> , 1974) ..	41
Fig. 7	Slip-dependent constitutive relation for shear rupture.....	43
Fig. 8	Schematic presentation of earthquake cyclic process (Ohnaka, 2004).....	45
Fig. 9	Nucleation process of shear fault rupture (Ohnaka, 2004).....	47
Fig. 10	Scaling relations between laboratory and field conditions.....	47
Fig. 11	Increase of water pressure at various depths as a function of time (D. A. Howells, 1976).....	51
Fig. 12	Reservoir level fluctuation, monthly frequency of seismic shocks, and emission of seismic energy at Hsingfengkiang Dam (Shen Shonggang <i>et al.</i> , 1973).....	63
Fig. 13	Schematic layout of Hsingfengkiang Dam (Hsu Tsung-Ho <i>et al.</i> , 1975).....	65
Fig.14	Distribution of epicenters (up to 1972) in the Hsingfengkiang storage zone.....	67

Fig. 15 Réponse dynamique du barrage de Hsingfengkiang à l'événement sismique déclenché (Hsu Tsung-ho <i>et al.</i> , 1975).....	68
Fig. 16 Distribution hypocentrale et anomalies de vitesse au barrage de Hsingfengkiang (Wang Miao-Yueh <i>et al.</i> , 1975)	70
Fig. 17 Distribution temporelle des secousses significatives déclenchées et anomalies de vitesse mesurées au barrage de Hsingfengkiang (Wang Miao-Yueh <i>et al.</i> , 1975).....	70
Fig. 18 Schéma du réservoir du barrage de Mratinje, avec les caractéristiques tectoniques principales	74
Fig. 19 Historique temporel des RTS pour les périodes de pics au barrage de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Podgorica).....	76
Fig. 20 Distribution des épacentres avant la mise en eau du réservoir de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Podgorica).....	78
Fig. 21 Distribution des épacentres trois ans après le remplissage du bassin de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Podgorica).....	78
Fig. 22 Distribution des accélérations le long de la partie centrale pour des événements critiques de RTS au barrage de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Skopje, 1987).....	80
Fig. 23 Emplacement des séismographes au barrage de Kurobe.....	84
Fig. 24 Fluctuation des événements microsismiques et du niveau d'eau dans la retenue.....	84
Fig. 25 Variation du coefficient de corrélation entre les événements sismiques et le niveau d'eau de la retenue du barrage de Kurobe	86
Fig. 26 Relation entre la fréquence mensuelle des événements sismiques et le niveau d'eau de la retenue du barrage de Kurobe	88
Fig. 27 Données sur les tremblements de terre avant et après la construction du barrage de Kurobe (Agence Météorologique du Japon)	88
Fig. 28 Changement temporel de l'occurrence mensuelle des événements sismiques au barrage de Takase	90
Fig. 29 Distribution hypocentrale des événements sismiques dans la région du barrage de Takase	92
Fig. 30 Fréquences de coupure, moments sismiques et chute de contrainte	94
Fig. 31 Schéma du réseau de contrôle des RTS pour le barrage de Poechos au Pérou (selon l'Institut sismologique du Pérou, Lima, 1973).....	96
Fig. 32 Partie représentative des résultats du contrôle du barrage de Poechos (selon l'Institut sismologique du Pérou, Lima 1979)	98

Fig. 15 Dynamic response of Hsingfengkiang Dam to a reservoir triggered event (Hsu Tsung-ho <i>et al.</i> , 1975)	69
Fig. 16 Hypocentral distribution and velocity anomalies at Hsingfengkiang Dam (Wang Miao-Yueh <i>et al.</i> , 1975).....	71
Fig. 17 Distribution in time of significant reservoir triggered shocks and of measured velocity anomalies at Hsingfengkiang Dam (Wang Miao-Yueh <i>et al.</i> , 1975).....	71
Fig. 18 Storage layout near the Mratinje dam, with main tectonic features.....	75
Fig. 19 Time history of RTS at peaking period at Mratinje Dam (from Seismological Institute, Podgorica)	77
Fig. 20 Distribution of epicenters prior to impounding of Mratinje storage (from Seismological Institute, Podgorica)	79
Fig. 21 Distribution of Epicenters three years after impounding (from Seismological Institute, Podgorica)	79
Fig. 22 Acceleration distribution along central cantilever for peaking RTS event at Mratinje Dam (from Seismological Institute, Skopje, 1987) ...	81
Fig. 23 Location of seismograph installed in Kurobe Dam	85
Fig. 24 Fluctuation of the seismic events and the water level of the reservoir..	85
Fig. 25 Variation of cross correlation coefficient between seismic events and the water level of the reservoir of Kurobe Dam	87
Fig. 26 Relation between the monthly frequency of seismic events and the water level in the reservoir of Kurobe Dam	89
Fig. 27 The earthquake data before and after the Kurobe Dam construction (Japan Meteorological Agency).....	89
Fig. 28 Temporal change of monthly occurrence rate of seismic events at Takase Dam.....	91
Fig. 29 Hypocentral distribution (plan) of seismic events in Takase Dam region	93
Fig. 30 Corner frequencies, seismic moments and stress drops	95
Fig. 31 Layout of RTS monitoring array for Poechos dam in Peru (from Seismological Institute of Peru, Lima, 1973)	97
Fig. 32 Representative section of monitoring results for Poechos dam (from Seismological Institute of Peru, Lima 1979)	99

AVANT-PROPOS

Les phénomènes sismiques importants déclenchés par la retenue affectent un petit nombre de barrages au monde. Au niveau microsismique, de tels phénomènes sont vraisemblablement beaucoup plus nombreux, vu qu'un certain nombre d'entre eux passent inaperçus. Dans certains cas, les conséquences de ces événements ont été graves.

La CIGB a voué une attention particulière à ce problème depuis l'année 1969, où elle a participé aux activités de l'UNESCO dans le domaine de la sismicité déclenchée par des retenues (Reservoir Triggered Seismicity - RTS). Cette question a été spécifiquement traitée lors du congrès de la CIGB de 1979 à New Delhi. En 1999, elle a été inscrite à l'ordre du jour du Comité technique des aspects sismiques des projets de barrages de la CIGB dans l'optique d'une évaluation de l'état actuel des connaissances dans ce domaine, afin de guider le projeteur sur ce problème potentiel, qui doit être considéré pour chaque grand barrage.

La conclusion principale du présent bulletin est que l'éventualité d'une RTS devrait être considérée pour chaque grand barrage dans le cadre des conditions sismotectoniques prépondérantes. Les barrages correctement conçus sur la base de conditions sismiques appropriées sont entièrement couverts contre le potentiel de phénomène sismique déclenché par la retenue. Néanmoins, les structures et les équipements se situant à proximité de la retenue pourraient être endommagés; cet événement représente ainsi un risque indirect lié à la RTS qui doit être examiné lors de la conception du barrage.

Le projet de ce bulletin a été élaboré par A. Bozovic, ancien Président du Comité. Une révision approfondie et des améliorations considérables ont été apportées par N. Matsumoto, M. Wieland et D. Babbitt. Des remerciements particuliers sont adressés au prof. C.R. Allen qui a effectué une relecture approfondie du bulletin et qui a formulé un certain nombre de remarques et de suggestions pertinentes.

Ce bulletin a été discuté lors des réunions annuelles de Dresde (2001), Foz de Iguassu (2002), Montréal (2003) et Séoul (2004).

Il vise à faciliter la compréhension de la nature des phénomènes de RTS et l'évaluation de leur probabilité d'occurrence.

M. WIELAND
Président,
Comité des aspects sismiques des projets de barrages

FOREWORD

Reservoir triggered seismic phenomena are affecting a small fraction of the dam population as significant triggered earthquakes. On microseismic level such phenomena are probably much wider as a number of them have gone unobserved. In some cases the consequences of the significant events were quite serious.

ICOLD has considered this problem and special attention was paid since 1969 when ICOLD was represented in UNESCO activities concerning Reservoir Triggered Seismicity (RTS). This question was specifically addressed during 1979 ICOLD Congress in New Delhi. In 1999 the question of Reservoir Triggered Seismicity was placed on the Agenda of ICOLD Technical Committee on Seismic Aspects of Dam Design in order to assess the state of knowledge in this field at the present time, for guidance in this potential problem, which must be taken in consideration for every large dams.

The main conclusion in this Bulletin is that RTS possibility should be considered for each large dam within the frame of prevailing seismotectonic conditions. Dams correctly designed on the basis of ascertained level of seismic influences are fully covered against possible triggered phenomena. But existing structures and facilities in the vicinity of the storage might be damaged and this circumstance represents the risk deriving from RTS which must be observed during the design of related dams.

The Draft of this Bulletin was prepared by A. Bozovic, former Chairman of the Committee. Extensive reviewing and significant improvements were contributed by N. Matsumoto, M. Wieland and D. Babbitt. Special thanks are expressed to Prof. C.R. Allen who reviewed the Bulletin and formulated a number of valuable remarks and suggestions.

The Bulletin was discussed at the Annual Meetings in Dresden (2001), Iguassu (2002), Montreal (2003) and Seoul (2004).

This Bulletin is intended to be of help in understanding the nature of and evaluating the likelihood of facing the RTS phenomena.

M. WIELAND
Chairman,
Committee on Seismic Aspects of Dam Design

1. INTRODUCTION

La problématique des phénomènes sismiques associés au remplissage des retenues de barrage a été considérée dans les cercles spécialisés de l'ingénierie des barrages et par une large catégorie de public à partir de 1935, lorsque de tels phénomènes liés au remplissage du Lake Mead (USA) ont été observés et discutés. Ultérieurement, d'autres cas similaires ont été constatés, dont plusieurs étaient associés à de fortes magnitudes sismiques et à des dommages importants. En 1970, l'UNESCO a mis en place un groupe d'experts pour examiner les problèmes liés à cette problématique. Plusieurs réunions et symposiums ont été organisés sur le sujet. Pendant le 13^e Congrès de la CIGB (New Delhi, 1979, Q 51), ce problème a été présenté et discuté. Il en a résulté la publication de plusieurs rapports, publications et livres traitant de ce sujet. La question reste toujours à l'ordre du jour, surtout quand la construction de nouveaux barrages est envisagée. Un important rapport résumant l'état des connaissances a été publié en 1997 par l'USSD [46].

Dans ce contexte, l'ensemble des phénomènes nommés Sismicité déclenchée par une retenue (Reservoir Triggered Seismicity - RTS) a reçu des noms différents dans plusieurs langues et publications. Le nom Sismicité induite par une retenue (Reservoir Induced Seismicity - RIS) a été fréquemment utilisé à cet égard. La CIGB a accepté (Antalya, 1999) l'usage de l'expression de Séismicité déclenchée par une retenue - RTS - comme l'expression la plus adéquate, du fait qu'elle reflète la vraie nature du phénomène.

Comme depuis 1979 la sismicité déclenchée par une retenue n'a pas été discutée ni commentée dans le cadre de la CIGB, il a été décidé qu'elle sera le sujet d'un Bulletin, à élaborer dans le cadre du Comité des aspects sismiques des projets de barrages.

Le titre "Directives sur la RTS" a été envisagé pour ce bulletin. Mais ces phénomènes sont fondamentalement de nature tectonique, comme la plupart des tremblements de terre. Les directives sur les barrages et les tremblements de terre sont en général aussi valables pour les cas de RTS. Par conséquent, ce Bulletin est concentré sur la compréhension des aspects spécifiques de la RTS et sur l'établissement des critères les plus importants à l'usage des ingénieurs des barrages. Le titre exprimant au mieux ce but est : « Retenues et Sismicité : État des connaissances ».

1. INTRODUCTION

The problem of seismic phenomena associated with impounding of reservoirs has been considered in dam engineering circles and among wider interested public since 1935, when such phenomena linked with impounding of Lake Mead (USA) were noted and discussed. A number of prominent cases followed, some of which were associated with high magnitudes and substantial damage. In 1970 UNESCO organized a group of experts to consider the related problems and a number of Meetings and Symposia were held in that respect. During the 13th Congress of ICOLD (New Delhi, 1979, Q 51) this problem was presented and discussed. A very large body of reports, publications and books in this respect, have been written and published and the question is still of very high current interest, especially while planning new dams. An important report, summarizing the present state of knowledge in this matter and related conclusions, was published in 1997 by USSD [46].

The set of phenomena addressed here as Reservoir Triggered Seismicity (RTS), have been given different names in various publications and languages. The name of Reservoir Induced Seismicity (RIS) has been and is frequently used in this respect. ICOLD has accepted (Antalya, 1999) the use of RTS as the most adequate expression. And it really is most adequate as it best reflects the nature of this phenomenon.

As since 1979, reservoir triggered seismicity has not been discussed and commented on within ICOLD, it was decided that RTS will be the subject matter of an ICOLD Bulletin to be created within the Committee on Seismic Aspects of Dam Design.

A possible title considered for the Bulletin was “Guidelines on RTS”. But triggered earthquakes are fundamentally tectonic phenomena like most earthquakes. Guidelines on dams and earthquakes in general are also valid for reservoir triggered variant. Therefore, this Bulletin is concentrated on understanding the specific features of reservoir triggered seismicity and on sorting the salient points for the use of dam engineers. The title felt to express best such intent and scope of the Bulletin is Reservoirs and Seismicity: State of Knowledge”.

2. PHÉNOMÈNES RELATIFS À LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE (RTS) ET DÉVELOPPEMENT DE LEUR ÉVALUATION ET INTERPRÉTATION

Le premier cas de RTS documenté fut celui du Lake Mead (barrage de Hoover, barrage-voûte 220 m de hauteur), qui a été observé après 1935. Il est à noter que pendant une longue période, ce cas fut considéré comme isolé (bien que probablement plusieurs autres cas soient passés inaperçus, surtout à l'échelle microsismique). Mais à la fin des années soixante, l'intérêt général porté à la RTS a rapidement augmenté, du fait de plusieurs événements, dont certains ont causé des dégâts majeurs.

Dès les premières observations, le sujet a été controversé. Plusieurs experts considéraient comme peu vraisemblable que la libération d'une énorme quantité d'énergie, correspondant à celle d'un tremblement de terre de forte magnitude, puisse être provoquée par un changement relativement faible de l'état des contraintes à une profondeur sismogénique, en raison du remplissage d'une retenue. De fait, l'état de contraintes dans les couches profondes de l'écorce terrestre et les propriétés rhéologiques prévalant à ces profondeurs étaient (et restent encore) largement inconnus.

Il convient de préciser que le remplissage de retenues artificielles ne constitue pas la seule cause pouvant conduire à un déclenchement de tremblements de terre. L'injection et l'extraction de fluides (principalement l'eau), les opérations minières, les explosions nucléaires souterraines, ainsi que le déclenchement de tremblements de terre par d'autres séismes, peuvent également être des facteurs déclencheurs. Par exemple, un déclenchement s'était produit suite à une variation de la pression d'injection d'eau dans le champ pétrolier de Rangely, dans le Colorado, USA [34]. Finalement, toutes les activités mentionnées sont susceptibles de conduire à un déclenchement de tremblement de terre, et les enregistrements démontrent cette réalité.

La problématique est restée un centre d'intérêt et d'investigations techniques. Ceci est principalement dû à son impact sur l'environnement et le risque potentiel qu'elle représente. Parallèlement, le nombre de barrages présentant des phénomènes sismiques déclenchés n'a cessé d'augmenter et le monitoring de ces phénomènes s'est amélioré avec le temps. Ce problème a donc été substantiellement clarifié et il est aujourd'hui admis que la sismicité déclenchée est une réponse physique d'une zone de la croûte terrestre au remplissage et à la rétention d'eau par des barrages, lorsque certaines conditions spécifiques sont satisfaites. Ainsi, les retenues artificielles des barrages peuvent déclencher une activité sismique pour laquelle les conditions naturelles nécessaires sont déjà présentes. Cela implique que la faille géologique pouvant produire le tremblement de terre est déjà proche des conditions limites de rupture. Le poids supplémentaire et la propagation de la pression interstitielle dus à la retenue pourraient mener à la libération de l'énergie

2. RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY PHENOMENA AND DEVELOPMENT OF THEIR EVALUATION AND INTERPRETATION

The first documented case of RTS was the case of Lake Mead (created by the Hoover Dam, a 220 m high arch dam) experienced after 1935. For a time it was an isolated case (although there probably were more RTS phenomena, especially on microseismic level, which went unobserved). But by the late 1960s, a number of significant triggered phenomena had accumulated, and some of them had quite serious consequences, so that the general interest for this phenomenon sharply increased.

From the very beginning, this subject has been controversial. A number of experts argued that it was not very credible that huge amounts of energy, corresponding to high magnitude earthquakes, can be released as a consequence of relatively small changes in the state of stresses at seismogenic depths, due to impounding. At the same time, the prevailing state of stresses and rheological properties of earth crust materials at such depths, were and remain largely unknown.

It should be noted that impounding of reservoirs is not the only perturbing factor which can lead to triggered earthquakes. Injection and withdrawal of fluids (mainly water), mining operations, underground nuclear explosions, as well as triggering of earthquakes by other earthquakes, can all be triggering factors (e.g. consequences of varying water injection pressures at Rangely oil field in Colorado, USA [34]). All mentioned activities can result in triggered phenomena and the existing records strongly support their reality.

The problem, however, has remained a target of sustained interest and studies, mainly because of its environmental impact and risk considerations. On the other hand, the number of dams exhibiting triggered seismic phenomena has kept increasing with the overall number of dams and the monitoring of triggered seismicity also improved with time. So this problem has been substantially clarified and consensus reached that the triggered seismicity is a physical response of a crustal region to reservoir impounding, when certain specific conditions are fulfilled. Impounding can cause triggering of seismic activity for which the necessary natural conditions are already developed. This means that the causative fault that can produce the earthquake energy releases is already in near failure conditions, so that added weight stresses and pore pressure propagation due to reservoir impounding, can trigger the seismic energy release. This definition asserts that triggering due to impounding cannot change the underlying tectonic processes and the seismic hazard

sismique et au déclenchement d'un tremblement de terre. Ceci présuppose qu'un déclenchement sismique dû au réservoir artificiel ne peut en aucun cas changer les processus tectoniques et le risque sismique d'un site de barrage si les conditions sismiques initiales sont correctement évaluées. Le poids supplémentaire dû à l'eau d'une retenue ne peut pas augmenter significativement l'énergie sismique libérée, parce que le potentiel énergétique ainsi ajouté est quasi-négligeable face au potentiel naturel de l'énergie sismique. Dans des régions à forte sismicité historique, l'évaluation du tremblement de terre critique est souvent correctement réalisée sur la base des données existantes. Cependant, dans des régions à faible sismicité historique, il est possible que des études néotectoniques soient nécessaires afin de déterminer les failles actives qui pourraient être sollicitées par la retenue et ainsi de définir le tremblement de terre critique (de projet). Dans ces conditions, un recours limité à d'anciennes données historiques peut mener à une mauvaise évaluation du tremblement de terre critique.

D'après ce qui précède, la condition pour un déclenchement sismique est l'existence d'une faille active ou d'une faille proche de sa limite de rupture. Dans cette optique, les phénomènes RTS peuvent être définis comme indiqué ci-dessous.

Les RTS sont des tremblements de terre qui se manifestent durant et après la rétention d'eau, en raison de l'interaction du poids de l'eau supplémentaire de la retenue et de la diffusion de la pression interstitielle, avec les failles à l'état de contraintes critique.

D'après les observations, les cas de RTS sont caractérisés par les points suivants :

- Les événements sismiques mesurés pendant et après la rétention d'eau sont nettement plus fréquents que l'activité sismique avant la rétention.
- L'augmentation du niveau de la retenue et de l'amplitude des oscillations de son plan d'eau, induit une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des phénomènes de RTS.
- Dans la majorité des cas, après avoir atteint un maximum, les événements déclenchés ont tendance à décroître en tendant vers leur activité initiale.

Mais il est à noter que ce n'est qu'une tendance. Les événements réels peuvent montrer des effets nettement retardés (habituellement interprétés en tant qu'effets de diffusion de la pression interstitielle) ou une tendance de la régénération de la RTS après une oscillation du niveau de la retenue retardée mais bien marquée (comme dans le cas du barrage de Mratinje, présenté dans ce bulletin). C'est assurément dû à la grande complexité des conditions régissant l'état critique des contraintes dans les failles, qui sont au-delà des possibilités d'observation directe. Par conséquent, la crédibilité de la nature de la RTS de chaque cas doit être évaluée par comparaison aux cas de RTS connus et de leur phénoménologie. À cet égard, la mise en place d'un réseau de surveillance sismique local, adapté aux conditions régnautes et activé au début de la construction (de préférence plusieurs années avant la mise en eau), est une condition nécessaire pour chaque grand barrage situé dans un secteur d'activité sismique. Les résultats de la surveillance régionale peuvent également être utiles, mais les détails au niveau microsismique ne peuvent être observés avec succès et résolus qu'à l'aide d'un réseau local approprié.

at the dam site, if the seismic potential at a dam site is correctly assessed. The added weight of water can not substantially increase the seismic energy release, because the increase of energy potential due to impounding is practically insignificant in view of the size of actual seismic energy releases. In regions of high historical seismicity, chances are that the controlling earthquake will be correctly assessed on the basis of available data. In regions of low historical seismicity it is possible that neotectonic studies are needed to single out the active faults, which can be triggered, thus defining the controlling design earthquake, which could otherwise be wrongly assigned if only the available historical data are taken into account.

The foregoing statement underlines clearly a basic requirement for the triggering activity: the existence of an active fault or a fault near its failure limit, to be available for triggering. And within this framework, RTS phenomena can be defined in the following way:

RTS events are seismic events manifested during and after impounding, due to interaction of the added weight of the storage water and the pore pressure diffusion, with the critically stressed causative faults.

From the observational viewpoint, the RTS cases are characterized by the following main features:

- The seismic events monitored during and after impounding are definitely more frequent than the background seismicity before impounding.
- With the increase of storage level and with larger oscillations of storage levels, the frequency and magnitude of RTS phenomena increase.
- In most cases the triggered events tend to be scaled down, after peaking, towards ambient background activity.

But it should be kept in mind that this is only an average picture. The actual events may show markedly delayed effects (usually interpreted as pore pressure diffusion effects) or a tendency of the revival of RTS, after delayed but marked storage level oscillation (like in the case of Mratinje Dam, presented in this Bulletin). This is undoubtedly due to great complexity of conditions governing the near critical state of stresses in causative faults, which are beyond our possibilities of direct observation. Therefore, the credibility of RTS nature of each monitored case must be appraised in comparison with known RTS cases and their phenomenology. And in that respect, deploying a local seismic monitoring network, adapted to prevailing conditions and activated at least by the start of construction (preferably several years before impounding), is a necessary requirement for each large dam located in a tectonically stressed area. The results of regional monitoring can also be helpful, but the fine details on the microseismic level can be successfully monitored and resolved only by an appropriate local network.

En conséquence, pour un séisme de projet correctement défini, la sismicité déclenchée ne peut pas augmenter le risque sismique à l'emplacement du barrage ou mettre en danger sa structure, s'il a été conçu pour faire face à des tremblements de terre selon les normes courantes, qui exigent que le barrage doit résister aux mouvements de la fondation provoqués par le séisme maximum envisageable (maximum credible earthquake - MCE). [Plutôt que d'utiliser le terme ambigu de MCE, il est plus approprié de se référer au séisme d'évaluation de sûreté (safety evaluation earthquake - SEE) qui, selon le risque sismique, peut être le MCE, le séisme maximum de dimensionnement (maximum design earthquake - MDE) ou un autre fort séisme pouvant être déterminé sur la base d'une analyse statistique de mesures de tremblements de terre historiques et/ou sur la base des traces néotectoniques et paléosismiques dans la région de la retenue]. Cependant, en considérant d'autres structures, bâtiments et ouvrages annexes qui pourraient ne pas avoir été conçus pour résister au (SEE), le risque sismique pourrait devoir être augmenté.

Il est difficile de clarifier la question de la magnitude maximale qui peut être attribuée à une RTS autrement qu'en le référant à la fréquence relative de tels cas comparés au nombre de grands barrages. Dans le cas de la sismicité générale, une magnitude maximale entre 8 et 9 est généralement acceptée, puisque découlant d'observations. Dans tous les cas admis de RTS, seuls quatre cas ayant une magnitude entre 6.0 à 6.3 ont été enregistrés (Tableau 1). Il est donc logique d'accepter cet intervalle comme limite maximale.

Chaque cas particulier devrait être étudié pour déterminer si des failles de taille correspondant à de telles magnitudes existent dans la zone d'influence de la retenue. Comme indiqué clairement dans ce bulletin, la RTS concerne seulement l'infrastructure et les bâtiments existants dans la zone de la rétention, car le barrage lui-même doit être conçu pour résister à des magnitudes supérieures à celles des phénomènes déclenchés.

Les aspects décrits précédemment font de la RTS un concept d'intérêt permanent pour le dimensionnement et la surveillance des barrages.

Consequently, for a correctly defined design earthquake, the triggered seismicity cannot increase the seismic hazard at the dam site or endanger the structure of a dam, which has been designed against earthquakes according to the current state-of-the-art requiring that the dam can safely withstand the ground motions caused by the maximum credible earthquake (MCE). [Rather than using the ambiguous term of MCE it may be more appropriate to refer to the safety evaluation earthquake (SEE), which depending on the seismic risk can be either the MCE, the maximum design earthquake (MDE) or another strong earthquake, that may be determined on the basis of a statistical analysis of historic earthquake records and/or based on the neotectonic and paleoseismic traces in the region of the reservoir.] However, taking in considerations other structures, buildings and appurtenant works which might not be designed to resist adequately the controlling (SEE) earthquake, the seismic risk could very well be increased.

The question of maximum magnitude which can be ascribed to RTS is difficult to clarify other than by relying on relative frequency of such cases compared to the number of large dams. In the case of general seismicity, the ceiling magnitude between 8 and 9 is generally accepted, as observed fact. Considering all accepted RTS cases, only in four cases the triggered magnitudes in the range of 6.0 to 6.3 have been recorded (Table 1). It is therefore logical to accept such a ceiling as a maximum possibility.

Each particular case should be investigated to determine whether faults of corresponding size for such large magnitudes exist within the zone of storage influence. As stated clearly in this Bulletin, RTS concerns only the existing infrastructure and buildings in the storage zone, as the dam itself must be designed for magnitudes covering the triggered possibilities.

The features outlined above make Reservoir Triggered Seismicity a concept of permanent interest for the design and monitoring of dams.

3. OCCURRENCE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR LA RETENUE DE BARRAGE

Il est relativement difficile de faire un inventaire précis de tous les cas de RTS, en raison de la difficulté à obtenir des données suffisamment crédibles et de la complexité du phénomène. Cependant, le nombre de cas de RTS admis est toujours en augmentation. En 1983, l'USGS a édité une banque de données sur des cas de RTS comportant 66 cas (Perman, Packer, Coppersmith et Kneupfer, 1983) [33]. Gupta (1992) dans son livre [13] arrive au même nombre. Le rapport de l'USSD (1997) sur les RTS [46] présente 40 cas de réservoirs fréquemment cités ayant subi une RTS (cette liste est reproduite au Tableau 1).

Une image globale intéressante est montrée à la Fig. 1 (Baecher et Keeney, 1982) [3], empruntée au rapport de l'USSD (1997) [46], représentant graphiquement la distribution des cas de RTS pour l'année 1982. Ce graphique ne serait pas sensiblement différent s'il était actualisé.

Six cas de magnitudes déclenchées au-dessus de $M = 5.7$ peuvent être dénombrés dans le Tableau 1. Selon le rapport de 2004 du Registre Mondial des Barrages [19], le nombre de barrages d'une hauteur supérieure à 100 m est 670. Rapportant les cas de grandes magnitudes à ce groupe, la fréquence de la RTS est ainsi égale à $6/670$, soit 0,0090. Cette valeur n'est pas négligeable.

Comme indiqué ci-dessus, le potentiel sismique d'un site donné est régi par des conditions tectoniques et n'est pas amplifié par la RTS. Cependant, le rythme de libération de l'énergie sismique peut être modifié; ceci peut influencer les analyses de risque. De toute façon, les grands barrages modernes devraient résister aux effets d'un tremblement de terre de magnitude de 6.5 (aucun tremblement de terre supérieur à une magnitude de 6.3 n'est admis comme phénomène de RTS) sans subir de dommages critiques. Par ailleurs, les bâtiments existants et les ouvrages annexes près du barrage pourraient être exposés à un risque significatif lié à l'RTS; ils devraient être vérifiés en conséquence.

3. FREQUENCY OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY

The total number of RTS cases is relatively difficult to know with precision due to difficulties in obtaining monitoring data of sufficient credibility and due to the complexity of the phenomenon, the number of accepted cases is increasing with time. In 1983, USGS published a Data Bank on RTS cases comprising 66 accepted cases (Perman, Packer, Coppersmith and Kneupfer, 1983) [33]. Gupta in his book (1992) [13], states a similar number of cases. USSD in their report on RTS (1997) [46], show 40 cases of reservoirs frequently cited to have experienced RTS (This list is reproduced here as Table 1).

An interesting overall picture is shown in a scattergraph (Fig. 1) (Baecher and Keeney, 1982) [3], taken from the USSD Report (1997) [46], graphically presenting the distribution of RTS cases as of 1982. This scattergraph would not be significantly different if updated today.

If we check the number of triggered magnitudes above $M=5.7$ from Table 1, we find six cases. According to the 2004 issue of the World Register of Dams [19], the overall number of dams higher than 100 m is 670. If we relate the high magnitude cases with this group, then the incidence of RTS is $6/670 = 0.0090$ and this is not a negligible value.

As stated earlier, the seismic potential at a given site is governed by tectonic conditions, and is not increased by RTS. However the timing of seismic energy release can be changed and this may influence the risk analyses. In any case, modern large dams should withstand the effects of a magnitude 6.5 earthquake (no higher magnitude earthquakes than 6.3 are known as RTS phenomena) without critical damages. On the other hand, the existing buildings and some appurtenant structures near the dam might be exposed to significant risk due to RTS and should be checked accordingly.

Tableau 1
Liste des cas de RTC fréquemment cités (USSD, 1997) [46]

RETENUE	PAYS	PROFONDEUR (M)	VOLUME (MILLION m ³)	IMPORTANCE OU INTENSITÉ DE L'ÉVÉNEMENT	NOTES
Akosombo	Ghana	109	148 000	MMI V	1
Almendra	Espagne	185	2 649	3,2	1
Aswan	Égypte	90	160 000	5,2	3
Benmore	Nelle Zélande	96	2 040	5,0	3
Blowering/Taibingo	Australie	142	2 559	3,5	3
Camarillas	Espagne	43	37	4,1	3
Canelles	Espagne	132	678	4,7	1
Capivara	Brésil	60	10 500	4,4	1
Cenajà	Espagne	97	472	4,2	4
Danjianangkou	Chine	97	16 000	4,7	4
El Grado	Espagne	85	400	MMI IV	1
Eucumbene	Australie	106	4 761	5,0	3
Furnas	Brésil	111	22 950	MMI V	4
Grandval	France	78	292	MMI V	1
Hoover	USA	191	36 703	5,0	3
Jocassee	USA	107	1 431	3,8	3
Kariba	Zambie	122	160 368	6,25	2
Kastraki	Grèce	91	100	4,6	2
Khoa Laem	Thaïlande	80	7 000	4,5	2
Koyna	Inde	100	2 780	6,3	3
Kremasta	Grèce	120	4 750	6,3	3,5
Kurobe	Japon	180	199	4,9	1
Manicouagan 3	Canada	96	10 423	4,1	2
Marathon	Grèce	60	41	5,75	4
Monteynard	France	125	275	MMI VII	4
Mossyrock	USA	124	1 957	4,3	4
Nurek	Tadjikistan	285	11 000	4,5	2
Oroville	USA	204	4 400	5,7	2 ou 3
Paraibuna/Paraitinga	Brésil	102	4 740	3,2	4
Piastra	Italie	84	13	MMI V	4
Preve Di Cadore	Italie	98	69	MMI V	4
Porto Columbia/Voltagrande	Brésil	50	3 760	5,1	4
Pukaki	Nelle Zélande	108	10 500	4,6	4
Shenwo	Chine	75	790	4,8	4
Swift	USA	116	932	5,0	4
Srinagarind	Thaïlande	133	17 745	5,9	3
Vouglans	France	112	605	4,4	4
Hsingfengkiang	Chine	105	13 896	6,0	3
Zhelin	Chine	62	7 170	3,2	4

1) Sans études sismiques locales

2) Études sismiques avant et après la rétention

3) Études sismiques après la rétention

4) Pas de données sur les études sismiques

5) La profondeur de la secousse principale de la RTS est supérieure à 20 km

Table 1
List of frequently cited RTS cases (USSD, 1997) [46]

RESERVOIR	COUNTRY	DEPTH (M)	VOLUME (MILLION m ³)	MAGNITUDE OR INTENSITY OF THE EVENT	NOTES
Akosombo	Ghana	109	148 000	MMI V	1
Almendra	Spain	185	2 649	3,2	1
Aswan	Egypt	90	160 000	5,2	3
Benmore	New Zealand	96	2 040	5,0	3
Blowering/Taibingo	Australia	142	2 559	3,5	3
Camarillas	Spain	43	37	4,1	3
Canelles	Spain	132	678	4,7	1
Capivara	Brazil	60	10 500	4,4	1
Cenajà	Spain	97	472	4,2	4
Danjiangankou	China	97	16 000	4,7	4
El Grado	Spain	85	400	MMI IV	1
Eucumbene	Australia	106	4 761	5,0	3
Furnas	Brazil	111	22 950	MMI V	4
Grandval	France	78	292	MMI V	1
Hoover	USA	191	36 703	5,0	3
Jocassee	USA	107	1 431	3,8	3
Kariba	Zambia	122	160 368	6,25	2
Kastraki	Greece	91	100	4,6	2
Khoa Laem	Thailand	80	7 000	4,5	2
Koyna	India	100	2 780	6,3	3
Kremasta	Greece	120	4 750	6,3	3,5
Kurobe	Japan	180	199	4,9	1
Manicouagan 3	Canada	96	10 423	4,1	2
Marathon	Greece	60	41	5,75	4
Monteynard	France	125	275	MMI VII	4
Mossyrock	USA	124	1 957	4,3	4
Nurek	Tajikistan	285	11 000	4,5	2
Oroville	USA	204	4 400	5,7	2 ou 3
Paraibuna/Paraitinga	Brazil	102	4 740	3,2	4
Piastra	Italia	84	13	MMI V	4
Preve Di Cadore	Italia	98	69	MMI V	4
Porto Columbia/Volta grande	Brazil	50	3 760	5,1	4
Pukaki	New Zealand	108	10 500	4,6	4
Shenwo	China	75	790	4,8	4
Swift	USA	116	932	5,0	4
Srinagarind	Thailand	133	17 745	5,9	3
Vouglans	France	112	605	4,4	4
Hsingfengkiang	China	105	13 896	6,0	3
Zhelin	China	62	7 170	3,2	4

1) No local seismic study

2) Pre/Post impoundment seismic study

3) Post impoundment seismic study

4) Seismic study status unknown

5) Main RTS shock was deeper than 20 km

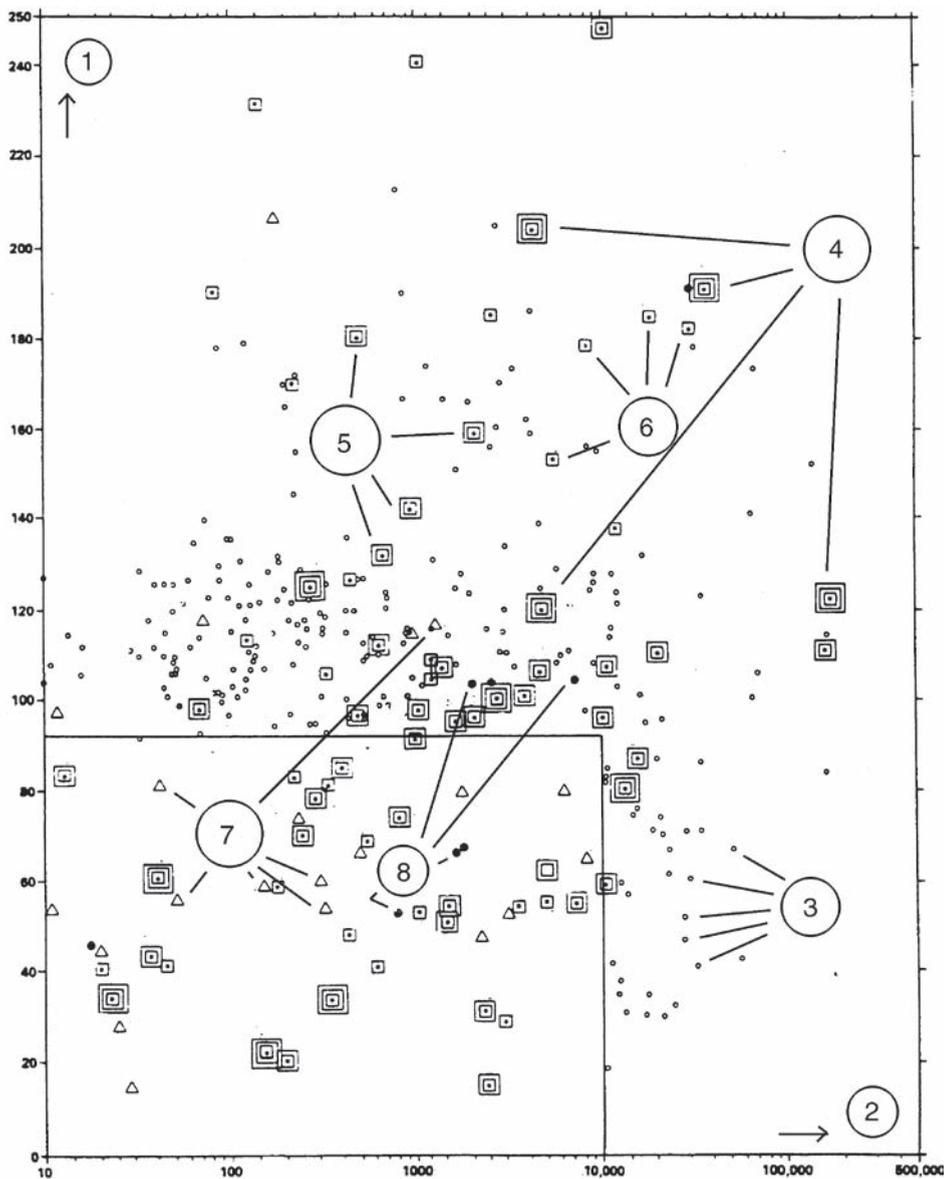


Fig. 1
Graphique des cas de RTS (USSD,1997) [46]

- 1) Profondeur d'eau (m) et /ou
- 2) Capacité (10^6 m^3 à l'échelle logarithmique)
- 3) Réservoir profond large
- 4) Cas de RTS acceptés, $M > 5$
- 5) Cas de RTS acceptés, M entre 3 et 5
- 6) Cas de RTS acceptés, $M < 3$
- 7) Cas de RTS non certains
- 8) Non RTS

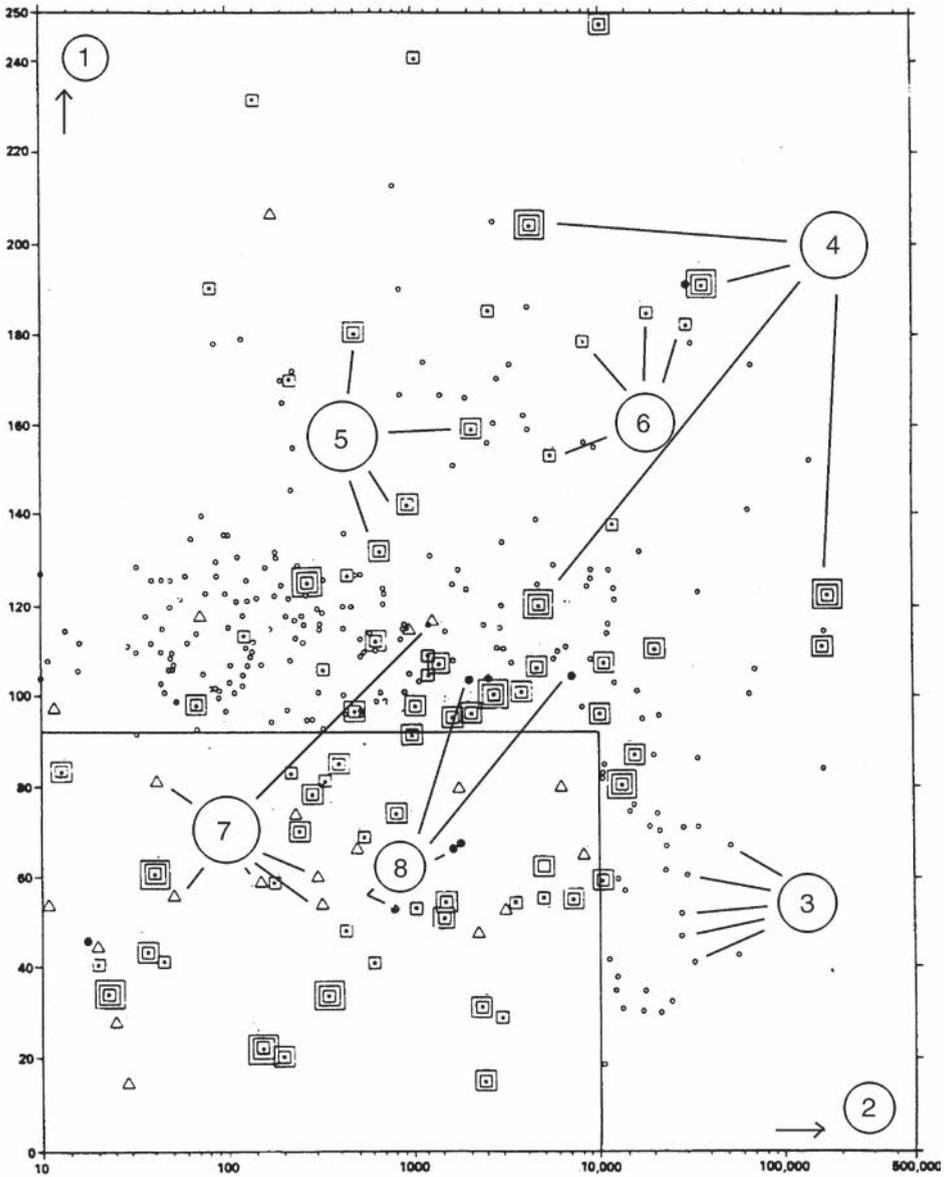


Fig. 1
Scatter graph of RTS cases (USSD,1997), [46]

- 1) Water depth (m)
- 2) Reservoir Capacity (10^6 m^3 in logarithmic scale)
- 3) Deep and/or very large reservoir
- 4) Accepted RTS case, $M > 5$
- 5) Accepted RTS case, M range 3/5
- 6) Accepted RTS case, $M < 3$
- 7) Questionable case of RTS
- 8) Not RTS

4. CARACTÉRISTIQUES DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE

Les chercheurs étudiant la RTS ont déterminé vers la fin des années 60 plusieurs facteurs qui sont liés à ce phénomène.

Fondamentalement, la RTS est une sismicité directement liée à la rétention d'eau par un barrage. Le potentiel sismique de la faille causale, source de la sismicité déclenchée, se développe pendant une longue période précédant l'épisode du déclenchement. Mais ce déclenchement est dû à la contribution de facteurs qui, pour une partie, influencent également la nature de l'amplitude-fréquence du dégagement d'énergie. Pour un phénomène naturel si complexe, il est impossible de déterminer précisément et clairement des liens causatifs et les règles régissantes. Seules des tendances peuvent être distinguées et interprétées avec quelque chance de succès.

Les paramètres de déclenchement sont le poids supplémentaire de l'eau de la retenue et la propagation des effets de la pression interstitielle engendrée par le réservoir. La différence principale entre les deux est que le poids supplémentaire dû à la rétention varie directement après la construction, alors que le changement de la pression interstitielle peut prendre du temps, parfois des années, jusqu'à ce que son effet soit entièrement atteint.

Dans un certain nombre de cas de RTS, l'intensité de la secousse observée a brusquement diminué avec la distance des épacentres, se manifestant seulement autour du réservoir. Cette observation, ajoutée au fait que dans certains cas, la sismicité déclenchée est suivie de phénomènes acoustiques, suggère que la RTS est une activité peu profonde.

Dans la plupart des cas, l'activité commence peu après le début de la rétention et se développe avec l'augmentation du niveau d'eau dans le réservoir. Elle se manifeste à nouveau, en règle générale, après des changements brusques du niveau d'eau.

Il y a une tendance indiquant qu'une grande différence de temps entre le début de la rétention et la secousse maximale déclenchée conduit à une secousse maximale supérieure. Cette tendance n'est ni très claire ni précise, mais une récente interprétation (Simpson et autres, 1988) [41] préconise qu'une réponse instantanément déclenchée est due principalement à l'effet du poids additionnel de la retenue, tandis qu'un déclenchement retardé est lié à une propagation plus lente de la pression interstitielle. Dans certains cas, de grandes magnitudes observées à grandes profondeurs sont déclenchées selon ce mécanisme. Ceci pourrait éventuellement expliquer la tendance mentionnée ci-dessus.

Il a également été noté que le rapport de la secousse maximale à la réplique sismique la plus élevée est plus haut que dans le cas des événements sismiques habituels (Gupta et Rastogi, 1976) [12] et (Logani, 1979) [26].

Il a été proposé [26] d'employer en tant qu'outil de diagnostic la valeur de b des relations de fréquence-magnitude ($\log N = a - b M$), où de grandes valeurs de b correspondent à la sismicité déclenchée. Mais une telle utilisation des valeurs de b est controversée.

4. CHARACTERISTICS OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY

The researchers studying RTS have formulated, as of late 1960's, several factors which are linked to RTS phenomena.

Fundamentally, RTS is seismicity concurrent with effects of reservoir impounding. The seismic potential of causative faults, the source of the triggered seismicity, develops a long time before the triggering episode. But its timing is a consequence of the influence of triggering agents which to a certain extent also influence the nature of amplitude/frequency content of energy release. For such a complex natural phenomenon it is impossible to determine sharp causative links and clear governing rules. Only trends can be distinguished and interpreted more or less successfully.

The triggering parameters of impounding are the added weight of impounded water and the propagation of pore pressure effects from the reservoir. The main difference between the two mentioned influences is that the added weight causes stress changes immediately after application, while the pore pressure build up may take time, sometimes years until the full effect is reached.

In a number of triggered cases, the observed intensity of shaking sharply decreased with distance from the epicenters, which usually cluster around the reservoir. This circumstance and also the fact that in some cases the triggered seismicity is followed by acoustic phenomena, suggest that RTS is a shallow activity.

In most cases the activity starts soon after the beginning of impounding and grows with reservoir levels, restarting as a rule after quick changes in reservoir levels.

There is a trend indicating that greater time difference between the start of impounding and the maximum triggered shock yields a larger maximum shock. This tendency is not very clear and precise, but one of newer interpretations (Simpson et al., 1988) [41] is that an instantaneously triggered response is due mainly to added weight influence while a delayed triggering is linked with slower pore pressure propagation. In some cases, larger magnitudes at greater depths are triggered in this way, which might explain the trend mentioned above.

It has been noted also that the ratio between maximum shock and the highest aftershock is higher than in the case of usual seismic events (Gupta and Rastogi, 1976) [12] and (Logani, 1979) [26]

It has been proposed [26] to use as diagnostic tool the b value from frequency-magnitude relations ($\log N = a - b M$), with large b -values indicating triggered seismicity. But such use of b -value is considered controversial.

Il est à considérer qu'un grand nombre d'événements déclenchés sont plus liés à des failles normales et décrochement qu'à des failles inverses.

Alors que les propriétés énumérées sont de grand intérêt et devraient être encore clarifiées, il n'est pas possible d'affirmer que les événements déclenchés par la rétention se rapportent à un mécanisme fondamentalement différent de celui des événements tectoniques. Un tremblement de terre est provoqué par un glissement le long de la faille causale, qu'il soit déclenché ou tectonique. Par conséquent, des différences fondamentales entre ces deux événements ne sont pas à attendre.

It is considered that more triggered events are linked to normal and strike slip faulting than to thrust faulting.

While the enumerated properties are of interest and should be further clarified, it cannot be stated that reservoir triggered events show a basically different failure mechanism in relation to tectonic events. An earthquake is caused by a slip along the causative fault, whether triggered or tectonic. Therefore, basic differences between the two events should not be expected.

5. MÉCANISME DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE ET RHÉOLOGIE DES MATÉRIAUX DE LA CROÛTE TERRESTRE

Des tremblements de terre relativement peu profonds sont les résultats les plus probables de la RTS. Ceci doit toutefois être considéré comme une tendance générale, du fait que des exceptions majeures sont possibles, comme dans le cas du réservoir d'Aswan, où des phénomènes de RTS ont été documentés à une profondeur de 25 km (Kebeasy et autres, 1987) [24].

L'émission des secousses sismiques dépend des propriétés rhéologiques de la croûte terrestre et de son interaction avec les forces tectoniques, que se soit pour les cas de la sismicité purement tectonique ou de RTS. Ainsi, le facteur décisif reste toujours la préparation tectonique des événements.

La difficulté principale de traitement des mécanismes de dégagement sismique d'énergie est que la rhéologie des matériaux dans la croûte aux profondeurs sismogéniques n'est pas connue par essais directs. Il semble aussi qu'il y a peu de chances que des essais de ce genre soient entrepris à l'avenir, même s'ils étaient possibles. Par conséquent, tout en modélisant et analysant les événements focaux, la seule approche réalisable est d'utiliser et d'extrapoler les résultats des essais en laboratoire pour des contraintes similaires et sous températures élevées. Plusieurs chercheurs ont effectué un certain nombre d'essais similaires (Brace, 1974) [7]. Une présentation qualitative des propriétés rhéologiques de la partie sismogénique de la croûte terrestre basée sur cette approche est montrée à la Fig. 2. Cette représentation est seulement qualitative et basée sur une extrapolation générale. Elle donne cependant une image crédible du comportement des matériaux de la croûte terrestre aux profondeurs sismogéniques.

5. MECHANISM OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY AND RHEOLOGY OF EARTH CRUST MATERIALS

Relatively shallow earthquakes are the most likely outcome of RTS. But, this statement has to be understood as a general trend, as significant exceptions are possible as in the case of Aswan reservoir, where RTS phenomena were documented at a depth of 25 km (Kebeasy et al., 1987) [24].

The emission of seismic shocks depends on the rheological properties of the earth crust and on its interaction with tectonic forces, both for purely tectonic seismicity and RTS, as in both cases the decisive factor is the tectonic preparation of the events.

The main difficulty in dealing with focal mechanisms of seismic energy release is that the rheology of crustal materials at seismogenic depths is not known by direct testing. And it seems that there are scarce chances that the related tests will be undertaken in the foreseeable future, if they are at all possible. Therefore, while modeling and analyzing the focal events, the only feasible approach is to use and extrapolate the results of laboratory tests under similar stresses and under high temperatures. Several researchers have carried out a number of such tests (Brace, 1974) [7]. A qualitative presentation of rheological properties of the seismogenic part of the earth crust, based on this approach is shown in Fig. 2. It should be understood that this presentation is of extrapolated and qualitative character but it is quite helpful in grasping a picture of credible behaviour of crustal materials at seismogenic depths.

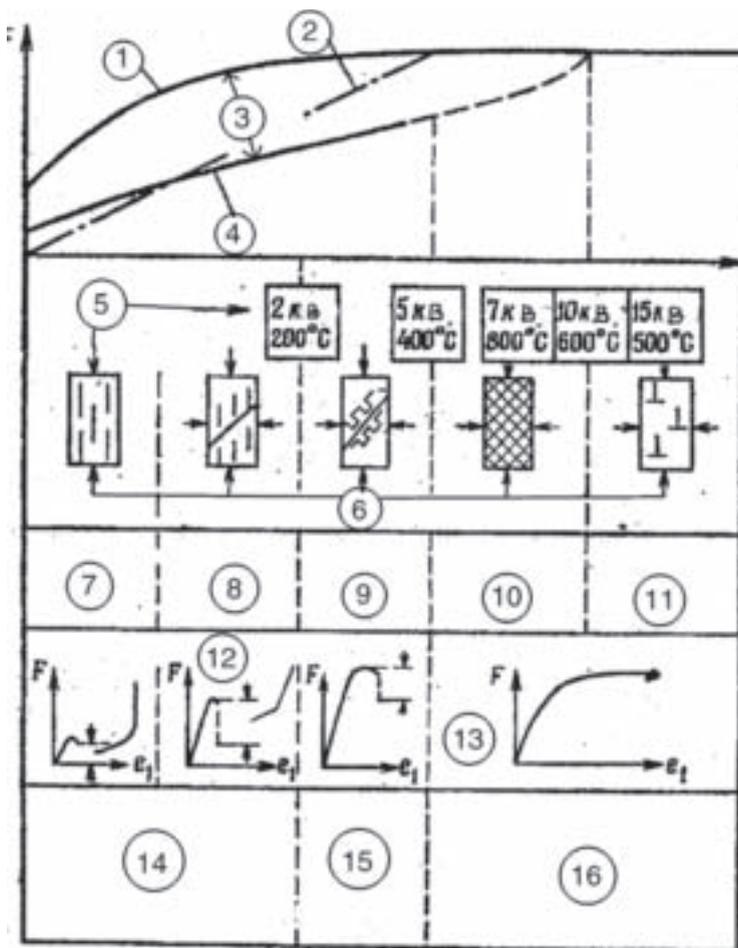


Fig. 2

Représentation qualitative des propriétés rhéologiques dans la zone sismogénique de la croûte rocheuse (Nikolayevskiy, 1982) [29]

- | | |
|-------------------------|---|
| 1) Enveloppe de rupture | 9) Déformation localisée |
| 2) Frottement sec | 10) Pseudo-plastique |
| 3) Zone de dilatance | 11) Plastique |
| 4) Limite élastique | 12) Chute de contrainte |
| 5) Granite | 13) Pas de chute de contrainte |
| 6) Mécanisme de rupture | 14) Rupture fragile |
| 7) Fissures verticales | 15) Région de décrochements consécutifs |
| 8) Fissures inclinées | 16) Rupture plastique |

La partie supérieure de la croûte terrestre se compose de roches généralement fragiles et fracturées, allant jusqu'à la discontinuité de Moho. L'eau circule sous haute pression par le système de fractures et de fissures. C'est une propriété assez importante. Elle est soutenue par la présence d'eau en circulation dans les mines et les tunnels profonds, mais n'est pas confirmée par des mesures directes aux profondeurs sismogéniques. Il est toujours supposé que cette eau en circulation

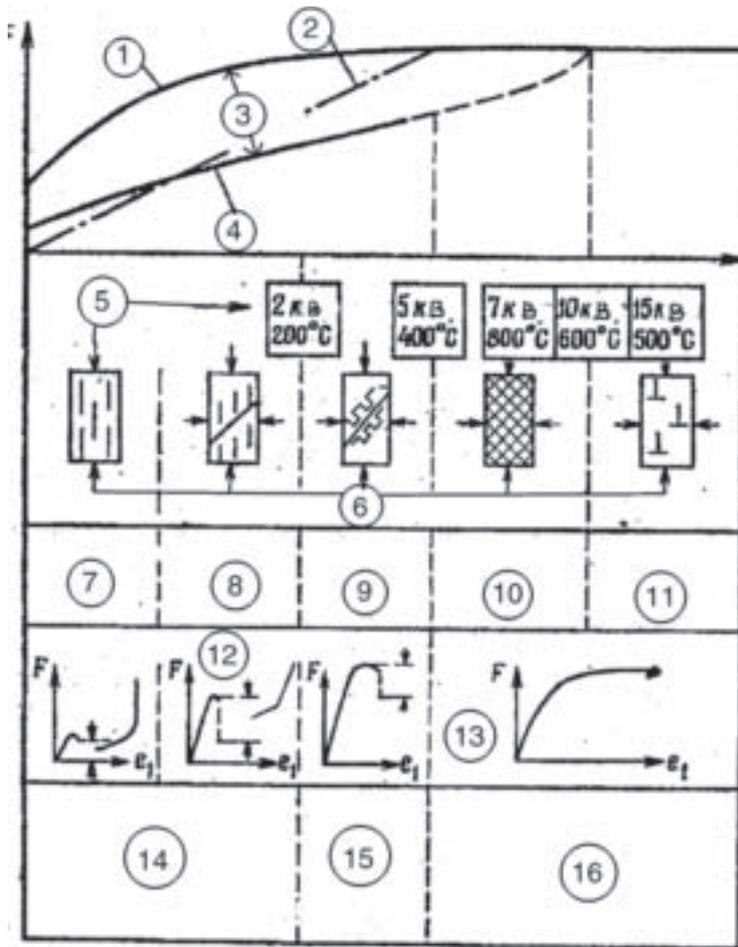


Fig. 2

Qualitative presentation of rheological properties in the seismogenic zone of the rock crust (Nikolayevskiy, 1982) [29]

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1) Failure envelop | 9) Localized deformation |
| 2) Dry friction | 10) Pseudo-plasticity |
| 3) Dilatancy zone | 11) Plasticity |
| 4) Elastic limit | 12) Stress drops |
| 5) Granite | 13) No stress drop |
| 6) Mechanisms of failure | 14) Brittle failure |
| 7) Vertical Fractures | 15) Stick-slip region |
| 8) Inclined cracks | 16) Plastic failure |

The upper part of the earth crust is composed of generally brittle and fractured rocks, down to the Moho discontinuity. Water circulates under high pressure through the system of cracks and fissures. This is quite an important property, supported by the presence of circulating water in deep mines and tunnels, but without confirmation of direct measurements at seismogenic depths. Still it is assumed that such circulating water can be present down to depths of 20 km and this

puisse atteindre des profondeurs allant jusqu'à 20 km ; cette supposition est suffisante pour nos réflexions. Quelques chercheurs considèrent que l'eau pourrait aussi atteindre la discontinuité de Moho (Nikolayevskiy, 1982) [29]. Au-dessous de cette discontinuité, un état plastique de la roche est considéré, impliquant un milieu imperméable. Il y a beaucoup de divergences par rapport à ce modèle simplifiée, mais le fait important est que les phénomènes sismiques ont lieu dans la partie fragile et fracturée de la croûte terrestre, dans laquelle l'eau circule, et que de tels phénomènes sont absents dans la masse plastique.

Comme montré à la Fig. 2, les différences dans le comportement rhéologique des matériaux de la croûte dépendent du rapport entre les efforts normaux et de cisaillement, ainsi que de la température. Dans la partie inférieure de la Fig. 2, la limite du comportement élastique des matériaux de la croûte est montrée, et dans la partie supérieure se trouve l'enveloppe de rupture délimitant la région. Entre ces deux courbes se trouve une région dans laquelle une rupture partielle des matériaux de la croûte se produit (connue sous le nom de phénomène de dilatance). Bien évidemment, c'est là seulement une représentation schématique. En fait, quand les contraintes dans la roche deviennent supérieures à environ 50% de la résistance limite des matériaux qui la composent, et sous l'effet des contraintes de confinement modérées, la roche subit une dilatation significative, qui est désigné sous le nom de dilatance. Cette formulation a été présentée vers la fin du 19ème siècle (Reynolds, 1885) et a été appliquée d'abord aux matériaux granulaires sous des déformations imposées. Dans le cas des matériaux composant la croûte, la dilatance survient lorsque les efforts de cisaillement causent des changements de volume irréversibles. Ceci augmente de manière significative la porosité de rupture des matériaux (Nikolayevskiy, 1982) [29].

La Fig. 2 montre que sous de faibles pressions de confinement, les fissures induites sont sub-verticales et les déformations sont continues.

Sous des pressions de confinement plus élevées, des fissures inclinées se forment et des déformations se produisent par étapes, suivies d'une diminution de contrainte.

La rupture se produit sous des contraintes et des températures respectivement supérieures à 200 MPa et 400°C. Elle cause des glissements intermittents avec des diminutions rapides de contrainte. Le mouvement est saccadé quand un freinage et une réactivation du glissement se produisent consécutivement. Ce modèle rhéologique est limité par des efforts hydrostatiques de 500 MPa et des températures de 400°C. Si cette limite est dépassée, des déformations plastiques et des fluages se produisent, impliquant que d'autres phénomènes sismiques sont à exclure.

Les phénomènes ci-dessus évoluent en présence de l'eau circulant dans les fissures, ce qui augmente la pression interstitielle. Cette dernière réduit les contraintes effectives, ce qui implique une baisse de la résistance au cisaillement.

Ce modèle rhéologique qualitatif est validé par des essais en laboratoire (Brace, 1974 [7]; Kisslinger, 1976 [25]; Byerlee, 1968 [10]; Handin et al., 1963 [15]; Stesky et al., 1974 [42]). Les essais particulièrement intéressants sont ceux simulant des pressions et des températures régnant dans la partie supérieure de la croûte terrestre et qui correspondent à des contraintes de quelques centaines de MPa et des températures des quelques centaines de degré Celsius.

is sufficient for our considerations. Some researchers consider that water could be present down to the Moho discontinuity (Nikolayevskiy, 1982) [29]. Below the Moho discontinuity a plastic state of the rock is assumed, meaning an impermeable medium. There are many divergences from this simplified picture, but of primary interest is the fact that the seismic phenomena are taking place in the brittle and fractured part of the earth crust in which water is circulating and that such phenomena are absent in the underlying plastic mass.

As shown in Fig. 2, differences in the rheological behavior of the crust material depend on the ratio of normal to shearing stresses and on temperature. In the lower part of Fig. 2 the limit of elastic behavior of crust material is shown and in the upper part the failure envelope limits the region. Between those two curves there is a region in which a partial failure of crust material happens, (known as dilatancy phenomenon). Naturally, this is only a schematic presentation. In fact, when the rock stresses become higher than about 50% of the strength of the rock material and under moderate confining stresses, the rock undergoes significant dilating deformation, which is referred to as dilatancy. This formulation was introduced by the end of 19th century (Reynolds, 1885) and was applied first to granular materials under imposed deformations. In the case of crust materials, dilatancy is provoked when shear stresses cause irreversible volume changes. This significantly increases the fracture porosity of materials (Nikolayevskiy, 1982) [29].

In Fig. 2 it can be seen that under smaller confining pressures, the induced cracks are subvertical and deformations have continuous character.

Under higher confining pressures, inclined principal cracks are formed and deformations are realized stepwise, followed by a stress drop.

Under stresses and temperatures higher than 200 MPa and 400 °C localization of fracturing occurs. It causes intermittent slips with stress drops. This is a stick-slip movement when braking and reactivation of movement along the fracture is present. This rheological model is limited by hydrostatic stresses of 500 MPa and temperatures of 400 °C. If this limit is exceeded, plastic deformations and creep take over, meaning that further seismic phenomena are precluded.

The described phenomena are evolving in the presence of water, which circulates through cracks, increasing pore pressure which reduces the effective stresses, thus causing the drop of shear resistance.

This qualitative rheological model is validated by laboratory tests (Brace, 1974 [7]; Kisslinger, 1976 [25]; Byerlee, 1968 [10]; Handin et al., 1963 [15]; Stesky et al. 1974 [42]). Of special interest for the subject matter in question are the tests simulating pressures and temperatures prevailing in the upper part of earth crust, meaning stresses of a few hundred MPa and temperatures of a few hundred °C.

Une représentation qualitative des phénomènes obtenus pendant de tels essais est donnée à la Fig. 3. Une simulation des secousses sismiques a été modélisée. Une secousse sismique est la conséquence d'une instabilité soudaine dans la croûte terrestre, où les contraintes et les déformations se sont lentement accumulées pendant de longues périodes. La Fig. 3 présente l'évolution d'un essai de compression triaxiale sous des pressions et des températures correspondant aux strates sismogéniques de la croûte terrestre. Après une première phase de déformation linéaire, succède la dilatance, suivie par la fracturation. Puis une rupture fragile le long des plans inclinés et fracturés débute, ayant comme résultat une baisse des contraintes de cisaillement. Ceci serait la première et principale secousse qui peut être suivie d'un glissement constant (dépendant du couple contrainte/température) ou d'un glissement successif (phénomène de glissement saccadé). Du fait que les secousses sismiques se produisent pratiquement sans exception le long des failles, la deuxième partie de ce phénomène est significative, vu que dans la plupart des cas, leur séquence correspond au modèle de glissement saccadé.

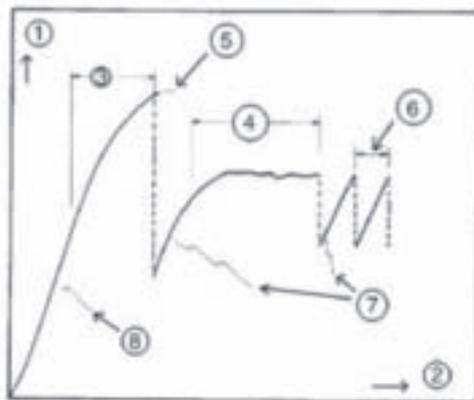


Fig. 3

Modèle de comportement généralisé de la roche sous compression confinée pour des conditions similaires à la croûte terrestre (selon Brace, 1974) [7]

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| 1) Cisaillement max. | 5) Fracturation |
| 2) Raccourcissement | 6) Glissement saccadé |
| 3) Évolution de la fissure, dilatance | 7) Faille bloquée |
| 4) Glissement stable | 8) Comportement élastique |

Les résultats détaillés des investigations de laboratoire sur les conditions régissant le glissement successif sont donnés à la Fig. 4. Ce glissement se produit ainsi sous des contraintes relativement élevées et sous des températures relativement basses. Il a été estimé que dans les conditions régnant dans la croûte terrestre, le phénomène de glissement saccadé pourrait se produire jusqu'à une profondeur de 20 km.

A qualitative presentation of phenomena obtained during such tests is given in Fig. 3. A simulation of seismic shocks was intended. A seismic shock is a consequence of a sudden instability within the earth crust, where the causative stresses and deformations are slowly accumulated during long periods. Fig. 3 presents the evolution of a triaxial compression test, under pressures and temperatures corresponding to seismogenic strata of the earth's crust. After an initial phase of linear deformation, dilatancy takes over, which is accompanied by cracking. Then a brittle failure along an inclined fracture plane initiates, resulting in a drop of the shear stresses. That would be the first, main shock that can be followed by stable sliding (depending on stress/temperature combination) or by successive slipping (stick-slip phenomenon). As the seismic shocks, practically without exception, happen along existing faults, this second part of the phenomenon is significant, for the sequence of seismic shocks, in most cases, follows the stick-slip model.

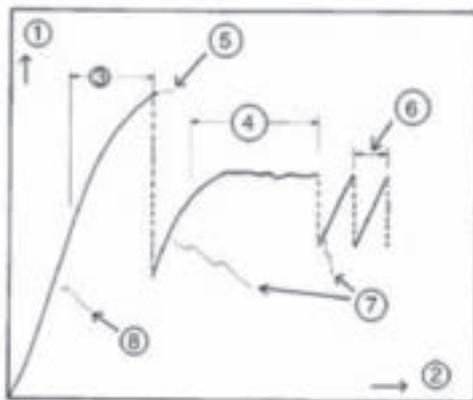


Fig. 3
Generalized behaviour of rock in confined compression under crustal conditions
(from Brace, 1974) [7]

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| 1) Max shear stress | 5) Fracturing |
| 2) Shortening | 6) Stick slip |
| 3) Crack growth, dilation | 7) Fault locked |
| 4) Stable sliding | 8) Elastic behaviour |

The results of detailed laboratory investigations of conditions governing successive slipping are given in Fig. 4. It can be seen that successive slipping happens under relatively high stresses and under relatively low temperatures. It was estimated that under conditions prevailing in the earth crust the stick-slip phenomenon could occur down to depths of 20 km.

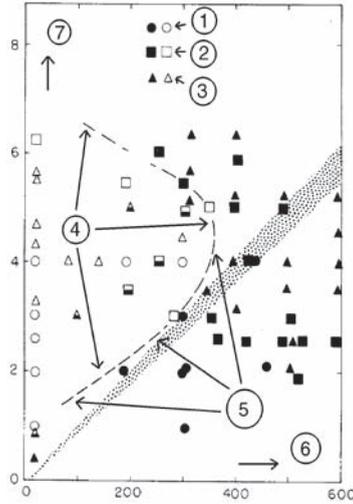


Fig. 4
Comportement de frottement en fonction de la pression et de la température
(selon Brace 1974 [7] et Brace and Byerlee 1970 [8])

- | | |
|--------------------------------------|----------------------|
| 1) Granite en forme de dents de scie | 5) Glissement stable |
| 2) Faille dans le granite | 6) Température °C |
| 3) Faille dans le gabbro | 7) Pression en kbar |
| 4) Glissement saccadé | |

Il s'est également avéré intéressant de vérifier la validité du principe des contraintes effectives pour des couches correspondant aux profondeurs sismogéniques. Les résultats des essais en laboratoire (Fig. 5) sous des contraintes élevées ont confirmé le comportement prévu (Byerlee, 1966) [9].

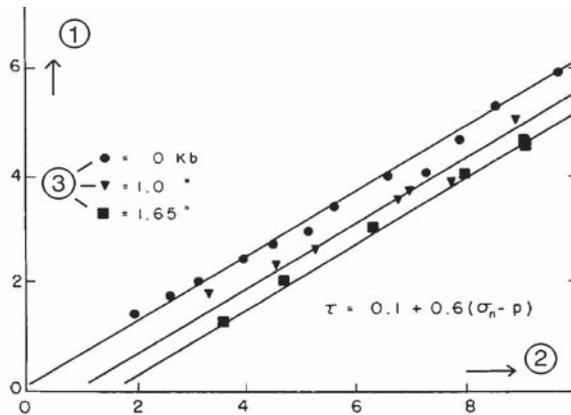


Fig. 5
Frottement dans le grès sous des pressions interstitielles variables
(selon Brace 1974 [7]; reproduit de Byerlee 1966 [9])

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 1) Contraintes de cisaillement (kbar) | 3) Pressions interstitielles |
| 2) Contraintes normales (kbar) | |

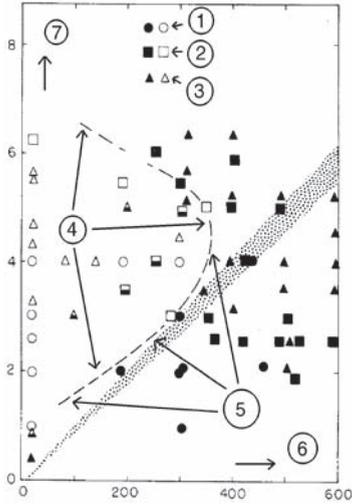


Fig. 4
Frictional behavior as a function of pressure and temperature
(from Brace 1974 [7]; taken from Brace and Byerlee 1970 [8])

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1) Sawcuts in granite | 5) Stable sliding |
| 2) Faults in granite | 6) Temperature °C |
| 3) Faults in gabbro | 7) Stresses in kbar |
| 4) Stick-slip | |

Of further interest was the verification of the validity of the principle of effective stresses for strata at seismogenic depths. The results of laboratory tests (Fig. 5) under high stresses have confirmed the expected behaviour (Byerlee, 1966) [9].

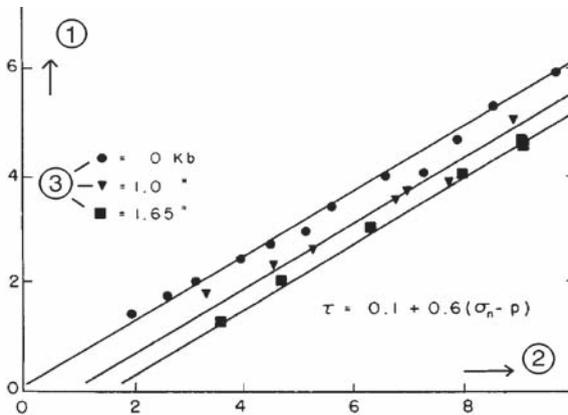


Fig. 5
Friction in sandstone, under varying pore pressures
(from Brace 1974 [7]; reproduced from Byerlee 1966 [9])

- | | |
|---------------------------|-------------------|
| 1) Shearing stress (kbar) | 3) Pore pressures |
| 2) Normal stress (kbar) | |

Une des conséquences intéressantes de la dilatance est que si le gradient de la déformation pendant la dilatance est suffisamment grand pour causer la baisse de la pression interstitielle (si l'infiltration ne sature pas et garde sous pression les fissures nouvellement formées dues à la dilatance), un renforcement de la roche apparaît, lié à l'augmentation des contraintes effectives. Naturellement, c'est un phénomène transitoire qui peut mener à la formation d'une anomalie de vitesse et à sa récupération postérieure (Barrage de Hsingfengkiang).

La rigidité des matériaux constituant la croûte terrestre est également influencée par la température aux profondeurs sismogéniques. La conséquence générale des températures accrues est une réduction de la résistance de la croûte au cisaillement. La Fig. 6 montre le résultat des essais avec une roche granitique sous des contraintes et des températures élevées. Il est possible de vérifier que dans la zone intéressant la RTS, l'augmentation de la température n'a pratiquement aucune influence sur le frottement et une influence limitée sur les contraintes de rupture ; en d'autres termes, une augmentation de la température de quelques centaines de degrés aura une influence mineure sur le comportement sismique des matériaux composant la croûte.

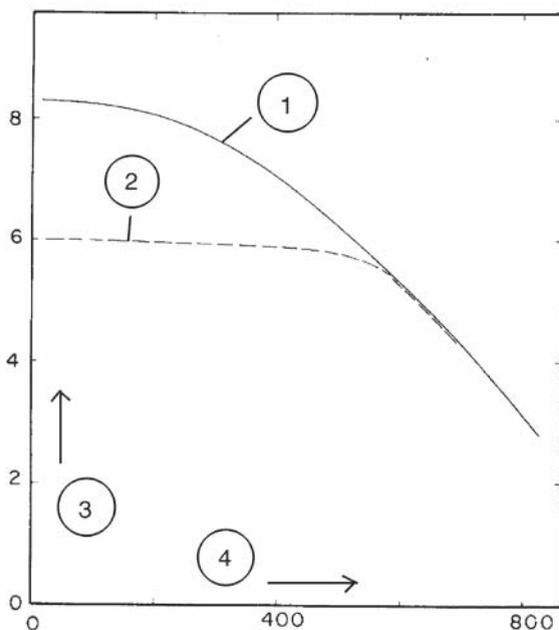


Fig. 6
Effet de la température sur la fracturation et le frottement du granite
pour une contrainte normale de 4 kbar
(selon Brace, 1974 [7]; reproduit de Stesky et al., 1974 [42])

- | | |
|--------------------------|--|
| 1) Ligne de fracturation | 3) Contrainte de cisaillement maximale |
| 2) Ligne de frottement | 4) Température °C |

One of the interesting consequences of dilatancy is that if the gradient of strain during dilatancy is sufficiently high to cause the drop of pore pressure (if filtration fails to saturate and keep pressurized newly formed dilatancy cracks) a strengthening of rock appears due to the increase of effective stresses. Of course, this is a transient phenomenon, which can play its role in the appearance of velocity anomaly and its later recuperation (Hsingfengkiang Dam).

The strength of crust material is also influenced by temperature prevailing at seismogenic depths. The general consequence of increased temperatures is a reduction of the shear strength in the crust. Fig. 6 shows the result of tests with granitic rock under high stresses and temperature. It can be seen that in the zone of interest for RTS, the temperature rise practically has no influence on friction and quite a limited influence on failure stresses, i.e. the temperature rise of few hundred degrees will have a minor influence on the seismic behaviour of crust materials.

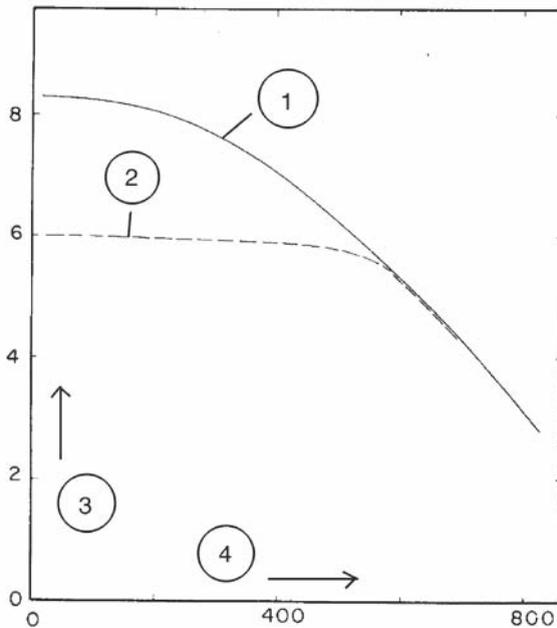


Fig. 6
 Effect of temperature on fracture and friction
 of granite at 4 kbar normal stress
 (From Brace, 1974 [7]; reproduced from Stesky et al., 1974 [42])

- 1) Fracture line
- 2) Friction line
- 3) Maximum shear stress
- 4) Temperature °C

L'interprétation du mécanisme de la RTS et la rhéologie des matériaux dans la zone sismogénique présentées dans les pages suivantes sont basées sur le traitement classique de la stabilité au frottement (théorie de Mohr-Coulomb). Mais vers la fin des années 80, plusieurs chercheurs ont remplacé la loi linéaire caractéristique de Mohr-Coulomb par des lois caractéristiques non linéaires plus fondamentales, qui sont basées sur le résultat d'essais en laboratoire. Deux volets d'investigation et d'interprétation des résultats ont été développés :

- La théorie du "taux & état" qui prend en compte la vitesse de glissement le long de la faille (taux) et les propriétés des matériaux dans la zone de glissement le long de la faille (état), (Magariaga et Olsen) [27] et (Turcotte et Malamud) [44] ; et
- La théorie de la "dépendance de glissement" développée par Ohnaka, 2004 [30].

Le mode de rupture dans les couches sismogéniques et les failles individuelles est une rupture par cisaillement. La relation caractéristique entre la traction de cisaillement τ et le déplacement D du glissement obtenu à partir des essais en laboratoire est illustrée à la Fig. 7 (Ohnaka, 2004) [30].

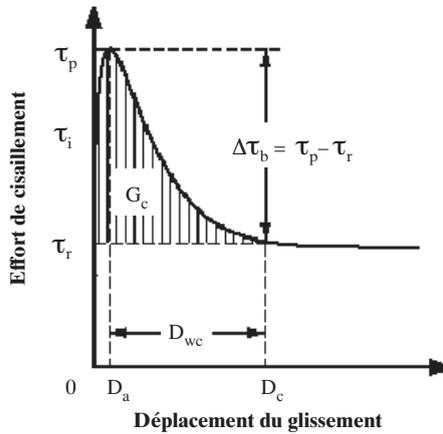


Fig. 7

Relation « dépendance du glissement » pour une rupture par cisaillement [30]

- τ_1 = effort initial avant le glissement
- τ_p = effort de cisaillement maximal
- $\Delta\tau_b$ = chute due à la dépression des contraintes définie par $\Delta\tau_b = \tau_p - \tau_r$ (τ_r = contrainte de frottement résiduel)
- D_a = glissement critique pour atteindre l'effort de cisaillement maximal
- D_{wc} = dépression du déplacement pour atteindre la contrainte de frottement résiduel
- G_c = énergie de la rupture par cisaillement, égale à la surface hachurée

La loi qui gouverne la rupture par cisaillement est exprimée par (Ohnaka, 2004) [30]:

$$\tau = f(D; D', \sigma_n, T, \lambda_c, CE)$$

The interpretation of the RTS mechanism and the rheology of materials in the seismogenic zone, presented in the foregoing pages, are based on the classical treatment of frictional stability (Mohr-Coulomb theory). But in the late 1980's several researchers replaced the linear Mohr-Coulomb constitutive law by more fundamental nonlinear constitutive laws, which are applied with the help of laboratory tests. Two lines of investigations and interpretation of findings were developed:

- The so called “rate & state” theory, which takes in consideration the velocity of slip realization along the causative fault (“rate”) and the properties of material in the zone of slip along the causative fault (state), (Magariaga and Olsen) [27] and (Turcotte and Malamud) [44]; and
- The “slip dependent” theory developed by Ohnaka, 2004 [30].

The mode of failure in the seismogenic layer and individual faults is shear rupture. The constitutive relation between shear traction τ and slip displacement D obtained from laboratory experiments is illustrated in Fig 7 (Ohnaka, 2004) [30].

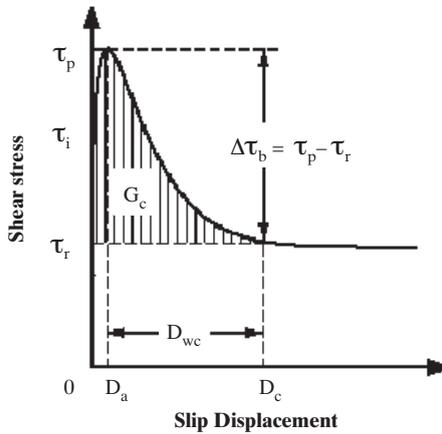


Fig. 7
Slip-dependent constitutive relation for shear rupture [30]

- τ_i = initial strength at the verge of slip
- τ_p = peak shear strength
- $\Delta\tau_b$ = breakdown stress drop, defined by $b = p - r$ (r = residual frictional stress)
- D_a = critical slip to reach the peak shear strength
- D_{wc} = breakdown displacement to degrade to the residual frictional strength
- G_c = shear rupture energy, equal to the shaded area

The constitutive law that governs shear failure is expressed as (Ohnaka, 2004) [30]:

$$\tau = f(D; D', \sigma_n, T, \lambda_c, CE)$$

où D est le glissement, D' le taux de glissement, σ_n la contrainte normale effective, T la température, λ_c la longueur d'onde prédominante représentant l'irrégularité géométrique de la surface de rupture et CE l'effet chimique de l'eau interstitielle. Bien que la contrainte maximale τ_p à la Fig. 7 ait principalement été utilisée dans la théorie classique de rupture, les relations caractéristiques modernes considèrent le processus de glissement de cisaillement ayant pour résultat l'incorporation de l'inhomogénéité et de la mise à l'échelle physique de la rupture de la faille.

Ces investigations relèvent de la physique non linéaire et s'apparentent à un processus de nucléation et d'instabilité de frottement et de glissement résultant. Des informations supplémentaires sur ce sujet sont données par Jennings et al. (2002) [21], où une série d'articles montre de nouveaux développements dans le domaine de la sismologie et des tremblements de terre.

Les trois figures suivantes montrent une représentation générale de l'approche avec quelques résultats obtenus.

La Fig. 8 est une représentation schématique du processus cyclique de grands tremblements de terre sur une faille.

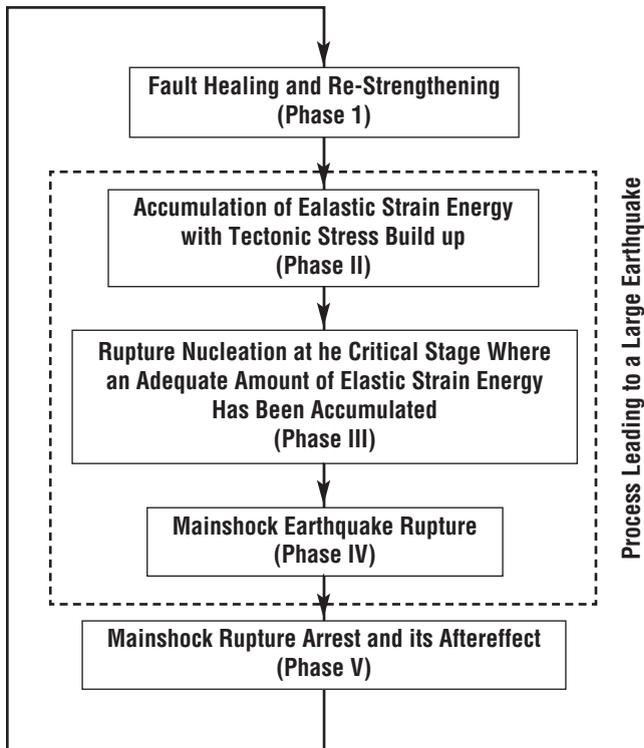


Fig. 8

Représentation schématique du processus cyclique d'un tremblement de terre (Ohnaka, 2004) [30]

where D is the slip, D' is the slip rate, σ_n is the effective normal stress, T is the temperature, λ_c is the predominant wave length representing the geometric irregularity of the rupture surface, and CE is the chemical effect of interstitial pore water. Although mainly the peak strength τ_p in Fig. 7 was used in the classical rupture theory, the modern constitutive relations take into account the total process of shear slip resulting in incorporating the inhomogeneity and physical scaling of the fault rupture.

These investigations are in the domain of nonlinear physics and are able to follow the nucleation process and the following friction instability and slip. More information on this matter can be found in (Jennings et al., 2002) [21] where a series of papers are addressing new developments in the field of seismology and earthquake engineering.

As a presentation of general approach and some results achieved, the following three Figures are displayed:

Fig. 8 is a schematic presentation of the cyclic process of large earthquakes on a fault.

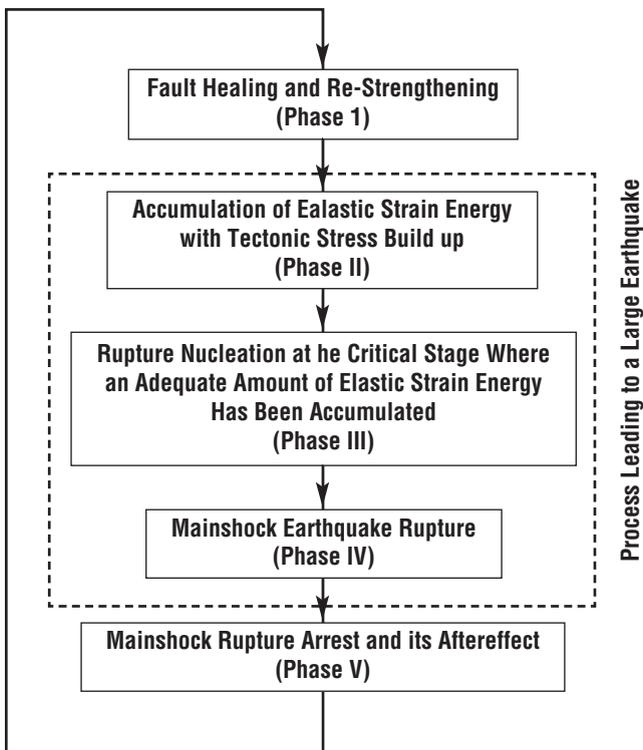


Fig. 8
Schematic presentation of earthquake cyclic process (Ohnaka, 2004) [30]

La Fig. 9 (Ohnaka, 2004) [30] montre la relation du taux de croissance de la rupture V et la longueur de croissance de la rupture L pour la formation d'une faille par cisaillement avec différentes rugosités de surface.

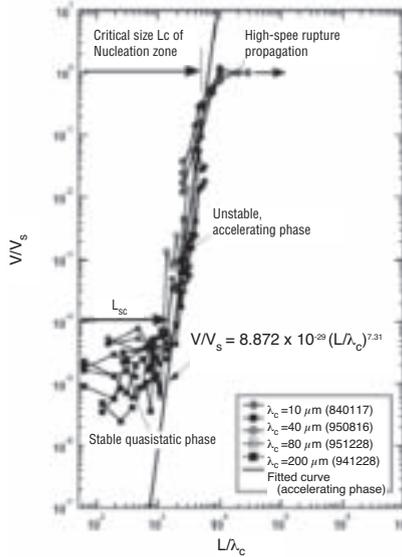


Fig. 9
Processus de nucléation d'une rupture d'une faille par cisaillement (Ohnaka, 2004) [30]

L'étape correspondant au passage critique de l'échelle du laboratoire à l'échelle réelle est montrée à la Fig. 10.

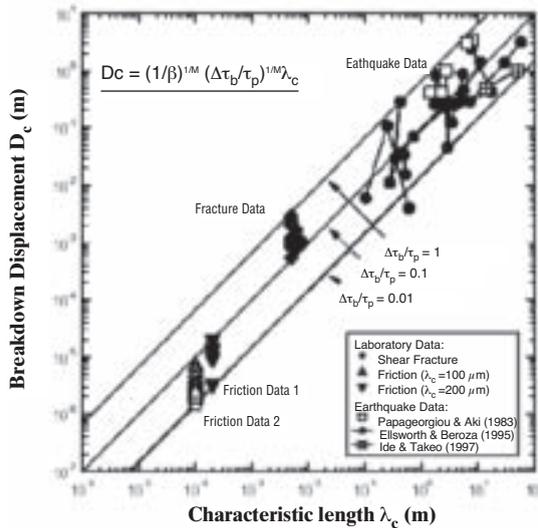


Fig. 10
Relation d'échelle entre les conditions en laboratoire et les conditions réelles [30]

Fig. 9, taken from (Ohnaka, 2004) [30], shows the relationship between rupture growth rate V and rupture growth length L , for shear fault nucleation on faults with different surface roughness.

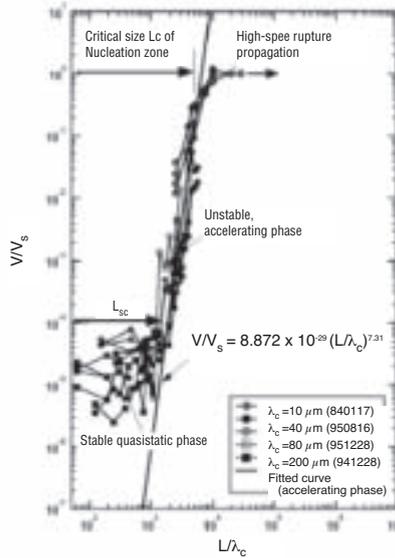


Fig. 9
Nucleation process of shear fault rupture (Ohnaka, 2004) [30]

The critical step of scaling from laboratory scale to field scale is shown in Fig. 10

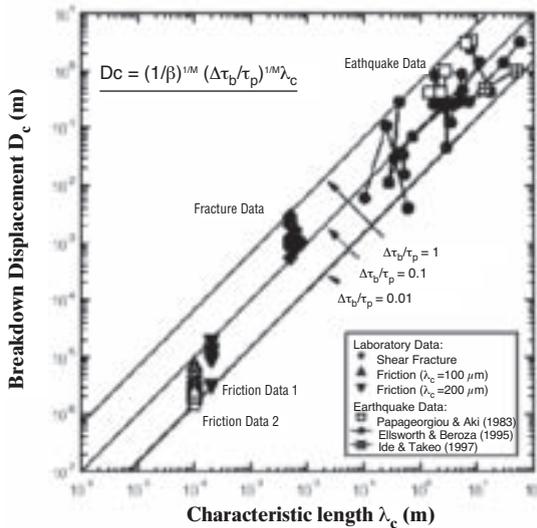


Fig. 10
Scaling relations between laboratory and field conditions [30]

La Fig. 10 montre la relation entre l'échelle du laboratoire et celle des conditions in situ correspondant au déplacement D_c et à la longueur caractéristique λ_c (longueur d'onde prédominante représentant l'irrégularité géométrique des surfaces de rupture).

Il est clair que cette approche plus réaliste fournirait une meilleure vue sur la formation des tremblements de terre et sur la rupture. Mais c'est un domaine de recherche encore en phase de développement ; son impact sur la sismologie est attendu pour les années à venir.

Fig. 10 shows the scaling between laboratory and field conditions in terms of breakdown displacement D_c and characteristic length λ_c , the predominant wave length representing the geometric irregularity of the rupturing surfaces.

It is clear that this more realistic approach provides a fuller insight into earthquake nucleation and rupturing. On the other hand it is a developing research field and its full impact on earthquake engineering is to be expected in years to come.

6. TEMPS DE DIFFUSION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE

Les pressions interstitielles dans les matériaux composant la croûte et leur développement dû à la rétention d'eau ont une influence directe sur l'équilibre des couches, se manifestant par des changements de contraintes effectives.

Après l'augmentation des pressions interstitielles proches de la surface dues au remplissage du réservoir, leur diffusion en profondeur se propage. Le temps de diffusion dépend de la perméabilité et de la capacité spécifique de la roche correspondante.

Une solution analytique existe seulement pour le problème unidimensionnel de la diffusion de la pression interstitielle (Howells, 1976) [16]. La Fig. 11 montre la durée nécessaire pour que l'action de la pression interstitielle agissant à proximité de la surface du réservoir puisse atteindre différentes profondeurs (les diagrammes sont donnés pour des valeurs moyennes de perméabilité et de capacité spécifique de la roche).

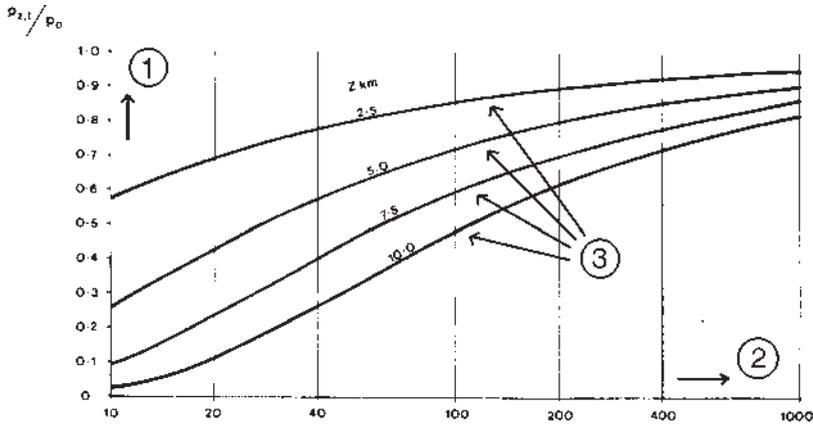


Fig. 11
Augmentation de la pression interstitielle pour différentes profondeurs en fonction du temps
(D.A. Howells, 1976) [16]

- 1) Rapport de la pression interstitielle atteinte (p_z / p_0) 3) Développement de la pression interstitielle en profondeur
2) Temps (jour)

Ainsi, la diffusion des pressions interstitielles à une profondeur de 2,5 km a besoin d'environ cent jours, alors que pour de plus grandes profondeurs, des durées beaucoup plus longues sont nécessaires.

L'information montrée sur la Fig. 11 est qualitative et esquisse l'évolution du changement des contraintes effectives. Mais les conditions réelles, tridimensionnelles, non homogènes et anisotropes, peuvent conduire à une évolution différant de manière significative de l'évaluation qualitative présentée ci-dessus.

7. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES RTS

Les explications du mécanisme de la RTS sont basées sur :

- I. le travail d'un certain nombre de chercheurs,
- II. les résultats des essais en laboratoire, et
- III. la surveillance d'un nombre significatif de retenues montrant des phénomènes de RTS.

Il est possible d'affirmer que la RTS est aujourd'hui considérée comme une réponse d'un certain nombre de réservoirs à la rétention. Il existe un large consensus sur l'acceptation de l'interprétation qualitative du phénomène (interaction du poids supplémentaire et de la propagation des pressions interstitielles avec le champ préexistant des contraintes tectoniques). L'information directe sur les conditions aux profondeurs sismogéniques est extrêmement rare. Il en va de même pour les efforts préexistants le long des failles exposées au déclenchement. Le barrage de Monticello est le seul où l'échantillonnage a été réalisé jusqu'à une profondeur de 2 km. Il n'est cependant pas vraisemblable qu'un échantillonnage à de telles profondeurs puisse avoir lieu dans le futur.

Ainsi, la modélisation des phénomènes sismiques déclenchés par une retenue ne peut pas être validée par des essais directs sur des profondeurs sismogéniques, ce qui risque de demeurer une particularité permanente du problème. Il est ainsi normal que certaines polémiques existent entre différents experts dans ce domaine. La surveillance des phénomènes sismiques déclenchés et des études complètes des conditions néotectoniques offrent les meilleures chances d'amélioration des connaissances au sujet de la RTS.

7. GENERAL STATEMENT ON UNDERSTANDING RTS PHENOMENA

The foregoing explanations of the mechanism of RTS are based on :

- I. the work of a number of researchers,
- II. supporting results of special laboratory testing, and
- III. monitoring of a significant number of reservoirs showing triggered seismicity phenomena.

It can be stated that RTS is today accepted as a response of a number of reservoirs to impounding. There is a broad consensus in accepting the qualitative interpretation of the phenomenon (interaction of added weight and pore pressures propagation with the pre-existing and governing field of tectonic stresses). It has to be recognized that the direct information on conditions at seismogenic depths is extremely scarce. The same applies to the pre-existing stresses along causative faults exposed to triggering effects. Only in the case of Monticello Dam was testing and sampling brought down to 2 km depth and chances for similar tests for other dams are quite remote.

So the modeling of triggered phenomena remains without validation through direct testing at seismogenic depths and this is likely to remain a constant feature of the problem. And in such situation it is no wonder that certain controversies exist between different experts in this field. Monitoring of triggered phenomena and thorough studies of neotectonic conditions represent our best opportunities to further our knowledge concerning RTS.

8. GESTION DES RISQUES

Le remplissage d'une retenue après la construction d'un barrage crée un champ de contraintes qui est immédiatement ajouté aux efforts tectoniques préexistants. Le champ de pressions interstitielles se forme et se propage en profondeur, diminuant graduellement les contraintes effectives initiales dues à l'action du champ de contrainte tectonique primaire et au poids supplémentaire de l'eau dans le réservoir.

Il est nécessaire de souligner que le champ des contraintes tectoniques préexistant et les caractéristiques des failles jouent un rôle primordial dans les phénomènes de RTS. Les phénomènes déclenchés dépendent de l'interaction du champ de contrainte tectonique et des effets de la rétention. Du fait que cette dernière génère seulement des efforts additionnels mineurs aux niveaux des profondeurs sismogéniques, il est évident que des tremblements de terre ne pourront être déclenchés que si les contraintes au niveau des failles sont proches de la limite de rupture.

Il y a une incertitude concernant l'éventualité que le poids vertical supplémentaire et/ou les pressions interstitielles additionnelles puissent vraiment représenter un agent déclencheur. Avant de considérer cette question en détail, il est utile d'analyser les facteurs principaux qui commandent la sismicité déclenchée :

- L'état initial des contraintes tectoniques le long de la faille. Il est important de connaître le régime tectonique, le type de la formation de la faille (normale, décrochement ou inverse) et l'état des contraintes le long de la faille. La meilleure indication serait à cet égard l'existence d'une formation de faille Quaternaire dans la région de la retenue. Ceci exigerait une étude néotectonique détaillée de la région. De telles études pourraient bien être décisives pour quantifier le risque de la RTS. L'importance de la présence d'une faille Quaternaire active aux environs du réservoir est fortement corroborée par le fait que la plupart des cas de RTS excédant la magnitude de 5,3 se sont produits dans les secteurs où une telle activité a été documentée. Au contraire, l'absence documentée d'une telle activité est une bonne indication qu'il ne faut pas s'attendre à des tremblements de terre déclenchés pouvant causer des dommages. Ce point de vue a été souligné par Allen [50].
- Conditions géologiques et hydrogéologiques ; l'identification des failles et une évaluation de leur perméabilité. Les propriétés mécaniques et hydrauliques des roches (contrainte, résistance à la friction, porosité et perméabilité), variations du niveau des nappes phréatiques et l'effet du niveau d'eau dans la retenue.
- Taille et forme du réservoir, sa profondeur (pressions interstitielles) et son volume (poids total), les variations historiques ou prévues de son niveau d'eau.

L'interaction des éléments cités ci-dessus influence le déclenchement de la RTS. Vu la nature des éléments impliqués, il est clair qu'une analyse rigoureuse n'est pas facilement réalisable. Le concept préconisant que le poids additionnel de

8. RISK MANAGEMENT

Filling of a reservoir after construction of a dam creates a gravity stress field, which is immediately added to the pre-existing tectonic stresses. The field of pore pressures follows, propagating in depth, gradually decreasing the initial effective stresses due to the action of the primary tectonic stress field and of the added weight of water in the reservoir.

It is necessary to emphasize that the pre-existing field of tectonic stresses and related pattern of faults play the primary role in RTS phenomena. The occurrence of triggered phenomena depends on the interaction of the tectonic stress field with the effects of reservoir impounding. As impoundment causes only minor additional stresses at seismogenic depths, it is clear that earthquakes can only be triggered if the existing stresses at causative faults are close to failure.

There is uncertainty regarding whether or not the added vertical weight and/or additional pore pressures are really serving as triggering agents. Prior to considering this question in more detail, it is useful to analyze the main factors, which control the triggered seismicity:

- Pre-existing state of tectonic stresses along the causative fault. It is of interest to know the tectonic regime and type of faulting (normal, strike-slip or reverse faulting), and the stress state along the causative faults. The best indication in this respect is the existence of Quaternary faulting in the reservoir region. This would require a detailed neotectonic study of the reservoir region. Such studies might well be decisive for quantifying the RTS risk. And the importance of the late Quaternary faults activity in reservoirs regions is strongly supported by the fact that most RTS cases exceeding about magnitude 5.3 have occurred in areas where such activity was documented. The documented absence of such activity is a strong indication that damaging triggered earthquakes should not be expected. This viewpoint was stressed by Allen [50].
- Geological and hydrogeological conditions; identification of faults and an assessment of their permeability. Mechanical and hydraulic properties of rocks (strength, frictional resistance, porosity and permeability), variations of groundwater tables and effect of the water level in the reservoir.
- Size and shape of the reservoir. Also depth (pore pressures) and volume (total weight) of reservoir. Time history or expected water level variations in the reservoir.

The interaction of the above elements influences the inception of RTS. Considering the nature of the elements involved, it is clear that a rigorous analysis is hardly feasible. The concept that added weight of reservoir water can increase the

l'eau du réservoir pourrait augmenter les efforts de cisaillement et que les pressions interstitielles additionnelles pourraient diminuer la résistance au cisaillement en réduisant les contraintes normales effectives, est largement accepté. Si les contraintes au niveau des failles sont déjà en état critique, il est logique de considérer que les agents mentionnés ci-dessus peuvent déclencher l'activité sismique. Étudiant les effets de l'augmentation de la pression interstitielle sur la stabilité de différents types de failles, il est possible de noter que, dans le cas de failles normales et décrochements, cette influence tend à déplacer le cercle de Mohr correspondant près de l'enveloppe de la rupture ; ceci correspond à une diminution de la résistance au cisaillement le long de la faille. Dans le cas de failles inverses, la tendance est opposée. Cette conclusion est fortement étayée par le fait que la plupart des RTS sont liées aux failles normales et décrochements.

Des modèles tridimensionnels sophistiqués ont été utilisés pour estimer les déformations sous le poids du réservoir (Westergaard et Adkins pour le lac Mead [39]) et pour évaluer spécifiquement la réponse des couches sismogéniques à la propagation de la pression interstitielle et l'évolution temporelle et spatiale (en profondeur) des contraintes (Bell et Nur pour le cas d'Oroville Dam, 1978 [4]). Ces études, ainsi que d'autres travaux similaires, représentent une référence très valable. Mais leurs auteurs ont déclaré que d'autres investigations in situ seraient nécessaires pour définir un certain nombre de paramètres principaux requis pour obtenir une validation appropriée (la pression de l'eau interstitielle mesurée en profondeur, les contraintes tectoniques en profondeur, la répartition de la perméabilité dans tout le domaine du modèle et les caractéristiques des contraintes en profondeur). De telles données doivent être acquises au moyen d'essais in situ ; toutefois, l'espoir de réaliser avec succès de tels essais reste très faible.

Par conséquent, les concepteurs de barrages sont obligés d'évaluer le risque de la RTS sur chaque grand barrage, ses ouvrages annexes et sur les bâtiments voisins en se basant sur les connaissances existantes. De nombreux cas de RTS documentés ont conduit à admettre que ces derniers sont des réponses à la rétention d'eau par des réservoirs artificiels. La meilleure approche pour chaque nouveau barrage est ainsi de vérifier (par des analyses néotectoniques) l'existence de failles près du barrage et du réservoir et d'évaluer le potentiel de tremblement de terre qui peut être associé à chaque faille (Wells et Coppersmith, 1994), [48]. Indépendamment de l'analyse de la sismicité historique, de telles analyses néotectoniques devraient être exécutées pour chaque grand barrage (particulièrement pour des barrages de hauteur supérieure à 100 m). En principe, le risque sismique d'un barrage évalué en réalisant une étude globale de son emplacement et de celui de sa retenue doit couvrir la RTS, le potentiel sismique dans les deux cas étant d'origine tectonique. Dans le cas de données historiques limitées, les analyses néotectoniques peuvent déterminer le tremblement de terre de contrôle. La tendance récente est que les études néotectoniques soient de plus en plus adoptées au détriment des analyses de risque, simplement parce que la base de donnée néotectonique dépasse de loin la base de donnée historique.

En règle générale, les barrages modernes devraient pouvoir résister à la RTS, du fait que la plus grande magnitude de RTS enregistrée est de 6,3 (Tableau 1). Mais les ouvrages annexes, les bâtiments et les structures voisines pourraient nécessiter une attention particulière.

shearing stresses and that additional pore pressures can decrease the shear strength by reducing the effective normal stresses, is widely accepted. If the causative faults are already critically stressed it is logical to consider that the aforementioned agents can trigger seismic activity. When the effects of pore pressure increase on the stability of different types of faults is investigated, it can be easily seen that in cases of normal and strike-slip faults this influence has a tendency to place the representative Mohr circle nearer to the failure envelope, i.e. the shear strength along the fault is decreased. Only in cases of reverse faults is the opposite tendency present. This conclusion is strongly supported by the fact that most RTS is linked with normal and strike-slip faults.

Sophisticated three-dimensional models were applied to estimate deformations under reservoir weight (Westergaard and Adkins for Lake Mead [39]) and specifically to assess the response of seismogenic strata to pore pressure propagation and stress changes with time and depth (Bell and Nur for the case of Oroville Dam, 1978 [4]). This and similar works were valuable efforts. But their authors stated that further site investigations would be necessary to define a number of key parameters needed to obtain reasonable validation (measured pore water pressures at depth, tectonic stresses at depth, permeability distribution throughout the model domain and strength characteristics at depth). Such data must be acquired by in situ testing and the prospects of being able to successfully perform such tests are poor.

Therefore, dam designers are obliged to assess the risk stemming from RTS for each large dam, its appurtenant structures and nearby buildings and structures on the basis of the existing knowledge. A relatively large number of documented RTS cases has resulted in a consensus that they are realistic responses to reservoir impounding. The best approach for each new dam is to check (through neotectonic analyses) for the existence of faults near the dam and reservoir and to assess what earthquake potential can be assigned to each fault (Wells and Coppersmith, 1994), [48]. Apart from analysis of historical seismicity, such neotectonic analyses should be performed for each large dam (especially for dams exceeding a height of 100 m). In principle, the seismic hazard determined for a dam by performing an overall study for the dam site and its reservoir, must cover RTS, the seismic potential in both cases being of tectonic origin. In cases of limited historical data, neotectonic analyses may determine the controlling earthquake. The recent trend is that neotectonic studies are increasingly dominating the hazard analyses, simply because the neotectonic record almost always far exceeds the historic record.

As a rule, modern dams should be able to cope with RTS, as the largest RTS magnitude recorded to date (Table 1) is 6.3. But some appurtenant structures and nearby buildings and structures might require special attention.

Un cas spécial de risque lié à de grands tremblements de terre déclenchés pourrait être la rupture d'une éventuelle faille croisant l'emplacement du barrage. Des références additionnelles sur ce genre de risque peuvent être trouvées dans le bulletin 112 [20] de la CIGB. Il n'y a cependant aucun cas documenté d'un barrage endommagé par la rupture d'une faille causée par un séisme déclenché, mais une telle possibilité ne doit pas être exclue. Au cas où une faille avec une activité Quaternaire bien documentée croiserait l'emplacement du barrage, le meilleur conseil serait de choisir un autre emplacement non exposé à un tel genre de risque.

L'impact relatif de la RTS sur des barrages et d'autres types de structures dépend du degré d'activité tectonique générale de la région dans laquelle la retenue est projetée. Dans une région tectoniquement stable, il n'y aura pas d'événements déclenchés. Si le barrage est placé dans une région tectoniquement active avec de grands gradients de déformations tectoniques et une sismicité ambiante élevée, on ne pourra identifier indiscutablement des événements déclenchés. L'impact relatif le plus élevé de la RTS est dans les zones de déformations tectoniques modérées et sismicité basse à modérée. Dans ce cas, les effets du poids supplémentaire et de la propagation de la pression interstitielle pourraient être suffisamment importants pour déclencher un événement sismique significatif. La plupart des cas importants de RTS appartiennent à de telles zones, avec un risque d'activité tectonique relativement modéré.

A special case of hazard linked to large triggered earthquakes might be the rupture of the causative fault, intersecting the dam site. More on this kind of hazard can be found in ICOLD Bulletin 112 [20]. There is no documented case of a dam damaged by fault rupture due to triggered earthquake, but such possibility must not be overlooked. In case that a capable fault with documented late Quaternary activity crosses the dam site, the best advice is to select another site, not exposed to such kind of hazard.

The relative impact of RTS on dams and other types of structures depends on the degree of general tectonic activity of the region in which the reservoir is placed. In a tectonically stable region, there simply would not be any triggered events. If the dam is placed in a tectonically active region with large gradients of tectonic deformations and high ambient seismicity, specifically distinguishable triggered events might not be present. The highest relative impact of RTS is in the zones of moderate tectonic deformations and low to moderate seismicity. There the effects of added weight and pore pressure propagation might be sufficient to trigger a significant seismic event. Most of the important RTS cases belong to such zones of moderate tectonic manifestations.

9. ANALYSE DE CAS

Le nombre exact de cas déclenchés par la rétention d'eau n'est pas connu avec certitude, car certains cas n'ont probablement pas été rapportés et d'autres ne sont pas acceptés en tant que phénomènes déclenchés. Le nombre de cas admis aujourd'hui se situe entre 40 et 100. Les événements les plus importants déclenchés par des retenues présentent des magnitudes maximales entre 6,0 et 6,3. Quarante cas significatifs sont montrés dans le Tableau 1 et un échantillon plus large est donné à la Fig. 1.

Une revue et une présentation complète de cas référencés serait intéressante. Mais de telles données ne sont pas aisément disponibles et il est plutôt difficile de rassembler l'information pertinente. Par conséquent, il est préférable de présenter quelques cas typiques. Les cas suivants correspondant à différentes caractéristiques (leur adéquation à la RTS allant de très marquée à zéro) sont présentés. Les cas choisis représentent la gamme des résultats auxquels on peut raisonnablement s'attendre lorsqu'un cas éventuel de RTS est considéré. Les cas choisis sont :

- Le barrage à contrefort de Hsingfengkiang en Chine, correspondant à une RTS de forte magnitude, causant un fort tremblement de terre local, qui a endommagé de manière notable le barrage.
- Le barrage voûte de Mratinje en Yougoslavie correspondant à une RTS de magnitude modérée. Ce cas est d'intérêt particulier vu que la surveillance sismique a été effectuée avant et après la rétention, montrant une réapparition de la RTS après 17 ans de service.
- Le barrage voûte de Kurobe représentant un cas dont la sismicité a été surveillée avant et après la rétention. Le cas est d'intérêt spécial vu que le barrage a été considéré comme un cas de RTS (Hagiwara et Ohtake, 1972) [14] sur la base de la surveillance microsismique après la rétention. Mais des analyses postérieures, en utilisant des données de surveillance sismique avant la rétention (fournie par des sources différentes) ont conclu que le barrage de Kurobe n'était pas un cas de RTS.
- Le barrage en enrochement de Takase est une grande digue soigneusement surveillée avant et après la rétention, où une activité microsismique similaire a été enregistrée avant et après la mise en eau.
- Le barrage en remblai de Poechos au Pérou du Nord correspondant à un environnement avec sismicité active et où la RTS était absente ou a été masquée par une activité de fond.

9.1. CAS DU BARRAGE DE HSINGFENGKIANG

Le barrage de Hsingfengkiang est un barrage à contreforts de 105 m de hauteur, construit dans la province de Kwantung, en Chine. Sa fondation est constituée d'une roche granitique relativement fissurée. Le volume de son réservoir

9. CASE HISTORIES

The exact number of reservoir triggered cases is not known with certainty as a number of less prominent cases were probably not reported and some discussed cases are not widely accepted as genuine triggered phenomena. The number of accepted cases is today somewhere between 40 and 100. The maximum recorded reservoir triggered events have had magnitudes ranging from 6.0 to 6.3. Forty significant cases are shown in Table 1 and a wider sample is included in Fig. 1.

A full review and presentation of known and available case histories would be valuable. But such data are not readily available and it is rather difficult to collect pertinent information. Therefore, the option of presenting a few typical cases is adopted here. The following cases with different characteristics (their RTS response ranging from very high to nil) are presented. The selected cases reasonably represent the range of probable outcomes when a prospective RTS case is considered. The selected cases are:

- Hsingfengkiang Buttress Dam in China, as a representative of large triggered seismicity, causing a strong local earthquake, which significantly damaged the dam.
- Mratinje Arch Dam in Yugoslavia as a representative of moderate RTS. It is of particular interest as seismic monitoring was introduced prior and after impounding, witnessing re-appearance of RTS after 17 years of service.
- Kurobe Arch Dam as a case which was seismically monitored prior and after impounding. The case is of special interest as the dam was reported as an RTS case (Hagiwara and Ohtake, 1972) [14] on the basis of microseismic monitoring after impounding. But later analyses, introducing monitoring data prior to impounding (available from different source) led to the conclusion that Kurobe dam was not an RTS case.
- Takase rockfill dam is a large dam carefully monitored prior and after impounding, where similar microseismic activity was present before and after impounding.
- Poechos Embankment Dam in Northern Peru as a case of seismically active environment where RTS was absent or was masked by basic background activity.

9.1. HSINGFENGKIANG DAM CASE HISTORY

The Hsingfengkiang Dam is a concrete buttress dam with a height of 105 m, built in the Kwantung Province, China. Relatively fractured granite rock forms its foundations. The reservoir volume amounts to 11.5 km³ and impounding started in

1959. The historical seismicity of the region was low so the dam was designed without special seismic considerations. Small quakes started after the start of reservoir impounding and continued through a number of years. In March 1962, the main RTS shock happened with a magnitude reported by Shen et al. 1973 [38] as 6.1 and given in Table 1 as 6.0. Epicenters of shocks clustered in the vicinity of the reservoir.

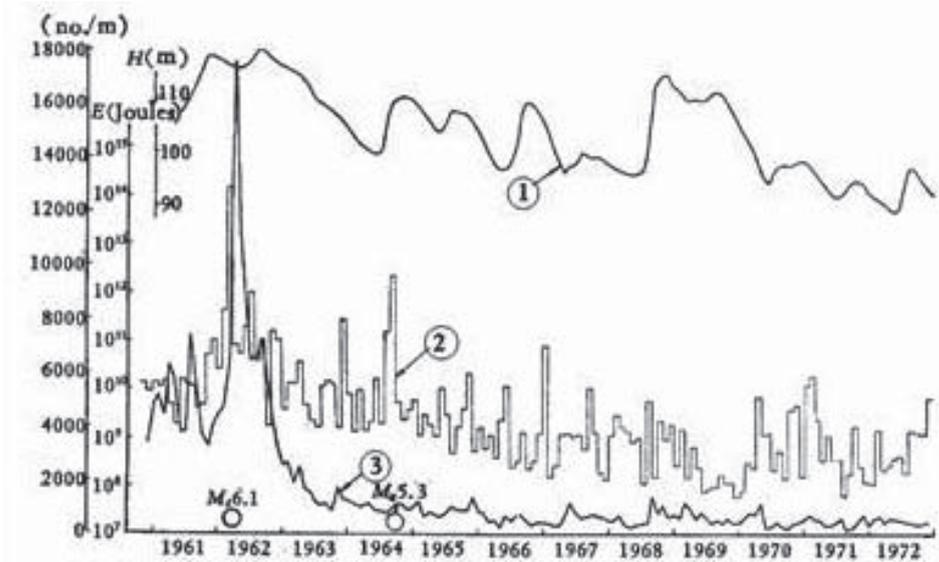


Fig. 12
Reservoir level fluctuation, monthly frequency of seismic shocks, and emission of seismic energy at Hsingfengkiang Dam (Shen Shonggang *et al.*, 1973) [38]

- 1) Reservoir level fluctuation
- 2) Monthly frequency of seismic shocks
- 3) Emission of seismic energy

The hypocentral depths were small, mainly 3 – 6 km, with a maximum of 12 km. The duration of intensive shaking was generally short. Accelerations measured on the dam had high amplification in the dam crest region and damage to the dam during the main shock was considerable. There were no strong motion instruments to record the main shock. The dam was repaired and strengthened in two subsequent occasions (after the prolonged seismic activity during impounding was ascertained and after the main shock damages).

The overall presentation of RTS for the Hsingfengkiang case is shown in Fig. 12 displaying reservoir level fluctuation, monthly frequency of seismic shocks and seismic energy emission.

In Fig. 13, the schematic layout of Hsingfengkiang Dam and the lower part of the reservoir are shown (the location of strong motion instruments is indicated in Fig. 15). It can be seen that RTS epicenters are generally clustered around the dam.

épicrocentres de la RTS sont groupés autour du barrage. La réponse dynamique du barrage montre de grandes amplifications à la crête du barrage. Il est d'un certain intérêt de noter que la valeur "b" de la série des secousses de la RTS est supérieure à l'unité, alors que la série précédente de sismicité normale montre une valeur "b" de 0,72.

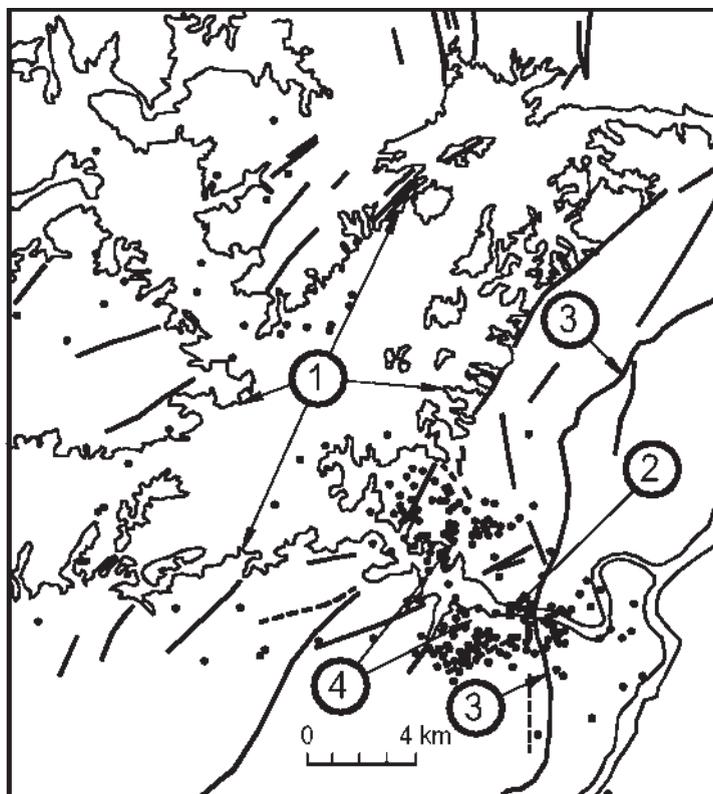


Fig. 13
Représentation schématique du barrage de Hsingfengkiang
(Hsu Tsung-Ho *et al.*, 1975) [14]

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1) Limite du niveau de la retenue | 3) Trace de la faille Hoyuan |
| 2) Emplacement du barrage | 4) Secousses déclenchées |

Il est également possible de noter que la faille principale de Hoyuan, accident tectonique majeur dans la région et actuellement active, se situe proche de la structure du barrage en aval de son emplacement.

Dans la présentation schématique ci-dessus, seules les zones correspondant aux événements déclenchés sont indiquées. En fait, la distribution épicrocentrale était beaucoup plus complexe, dans l'espace et dans le temps. En décembre 1972 plus de 250 000 secousses enregistrées ont été rapportées, dont 23 000 étaient supérieures à $M = 1$, avec une pointe de $M = 6,1$. La distribution des épicrocentres est donnée à la Fig. 14.

The dynamic response of the dam shows large amplification near the top of dam. It is of some interest to note that the “b” value from RTS series of shocks is above unity, while the previous series of natural seismicity shows a “b” value of 0.72.

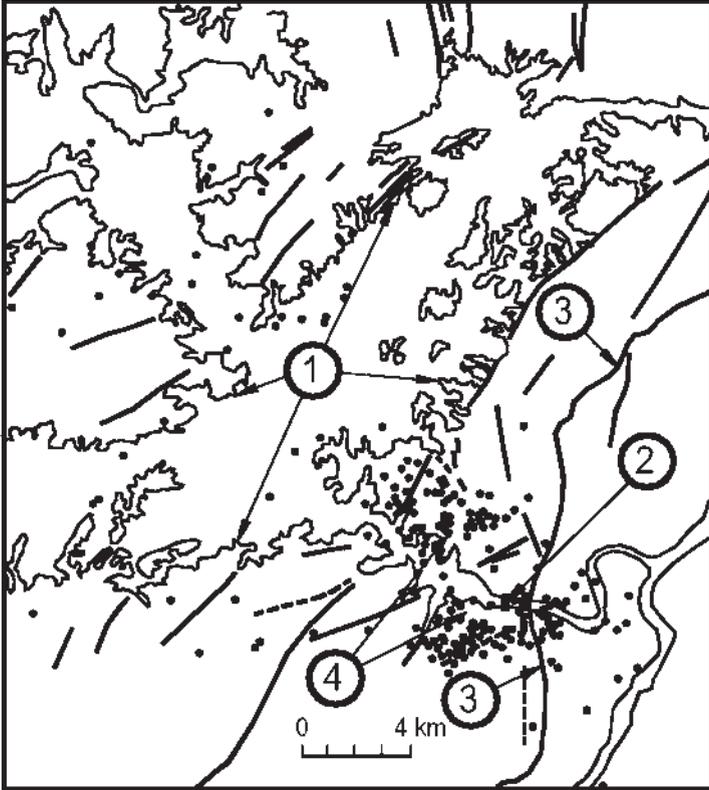


Fig. 13
Schematic layout of Hsingfengkiang Dam (Hsu Tsung-Ho *et al.*, 1975) [14]

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 1) Storage rim level line | 3) Hoyuan fault trace |
| 2) Dam location | 4) Clustering of triggered shocks |

It can be also seen that the Hoyuan master fault, the main tectonic feature in the region and active at present, passes near the dam structure downstream of the site.

In the above schematic presentation the clustering zones of triggered events are only indicated. Actually, the epicentral distribution was much more complex, spatially and in time. By December 1972 more than 250,000 recorded shocks were reported, out of which more than 23,000 were above $M_s > 1$, peaking with $M = 6.1$. The distribution of epicenters is given in Fig. 14.

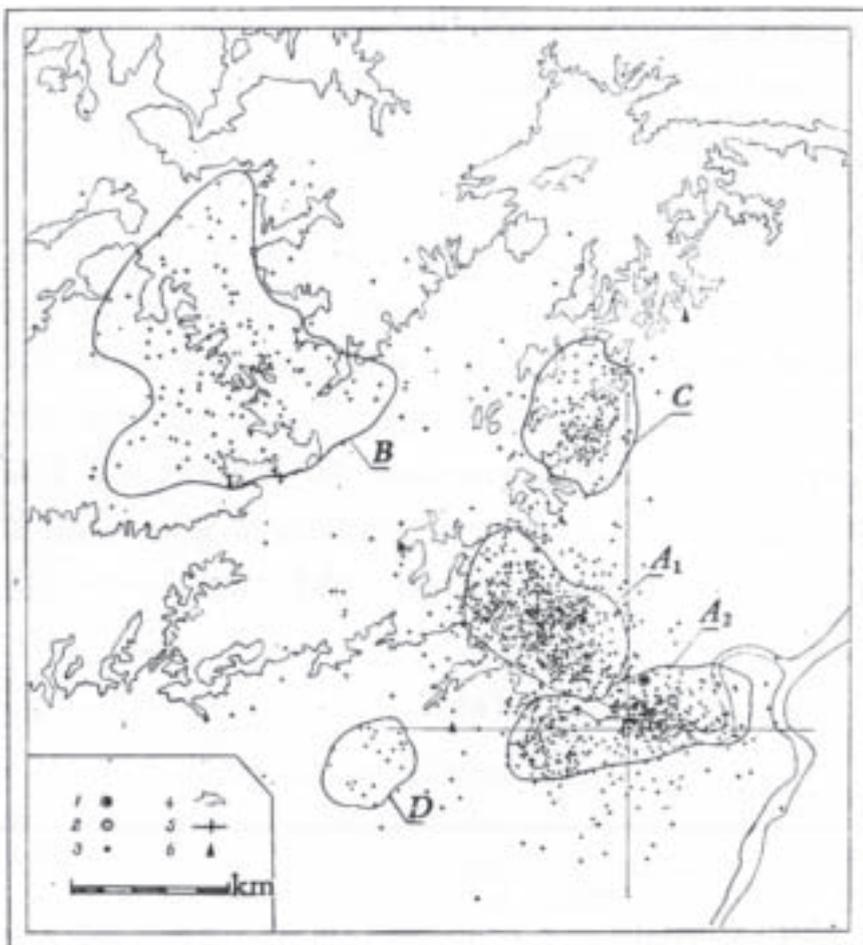


Fig.14
Distribution des épacentres (jusqu'en 1972) dans la zone de la retenue de Hsingfengkiang [38]

La concentration principale (ainsi que la secousse principale de $M = 6,1$) est centrée sur le barrage, à droite en bas de la figure. L'accident tectonique majeur, correspondant à la faille de Hoyuan (indiquée à la Fig. 13) actuellement active, passe à courte distance à l'aval du barrage, parallèlement à son axe, exactement à travers la concentration épacentrale maximale.

À la Fig. 15 des détails de la réponse dynamique du barrage sont présentés. Des concentrations d'accélération et de contraintes sont montrées près de sa crête. Ceci explique l'apparition à ce niveau d'une fissure horizontale longue de 82 m.

Ce barrage, qui a été construit comme un barrage typique à contreforts, a été réparé et renforcé par un remplissage partiel en béton entre les contreforts, de sorte qu'aujourd'hui le barrage de Hsingfengkiang est plutôt considéré comme barrage poids.

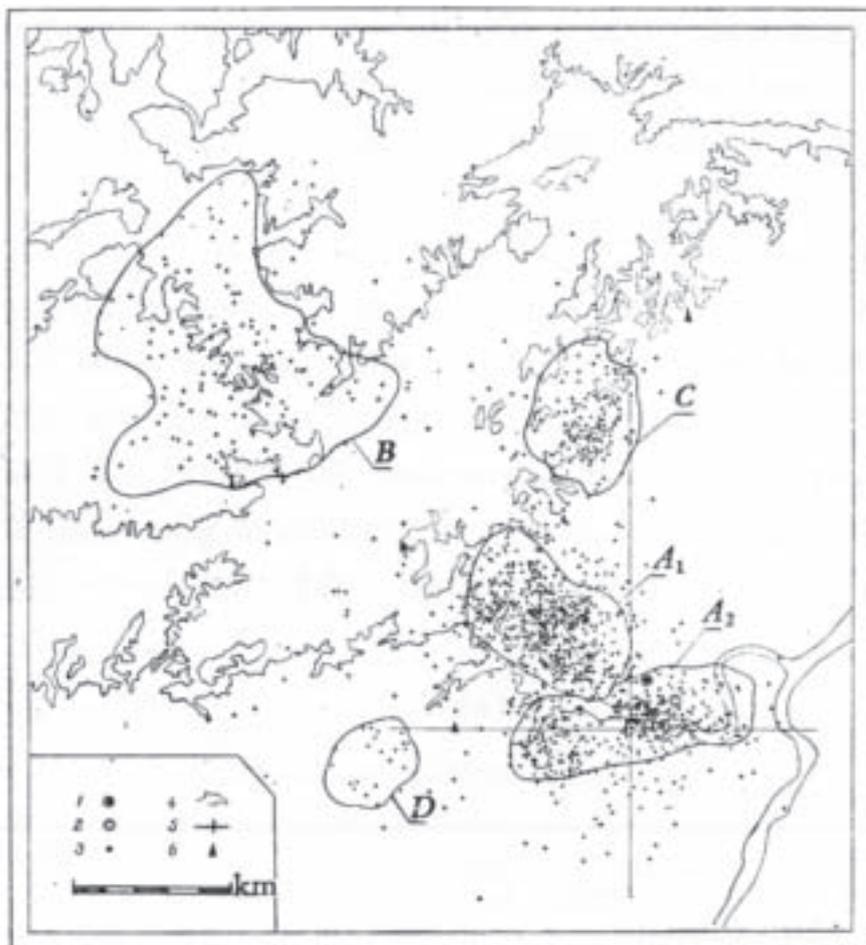


Fig.14
Distribution of epicenters (up to 1972) in the Hsingfengkiang storage zone [38]

It can be seen that the main concentration (together with the main shock $M = 6.1$) is centered on the dam in the lower right corner of the picture. The main tectonic feature active at present time, the Hoyuan fault (indicated in Fig. 13), passes downstream and subparallel to the dam axis, at a short distance from it, right through the maximum epicentral concentration.

In Fig.15 details of the dynamic response of the dam are presented. Pronounced concentration of accelerations and stresses exist near the dam top. This explains the appearance of a 82 m long horizontal crack near the dam crest.

This dam, which was built as typical buttress dam, was repaired and strengthened and the space between the buttresses was partly filled by concrete so that today Hsingfengkiang Dam is rather massive gravity structure.

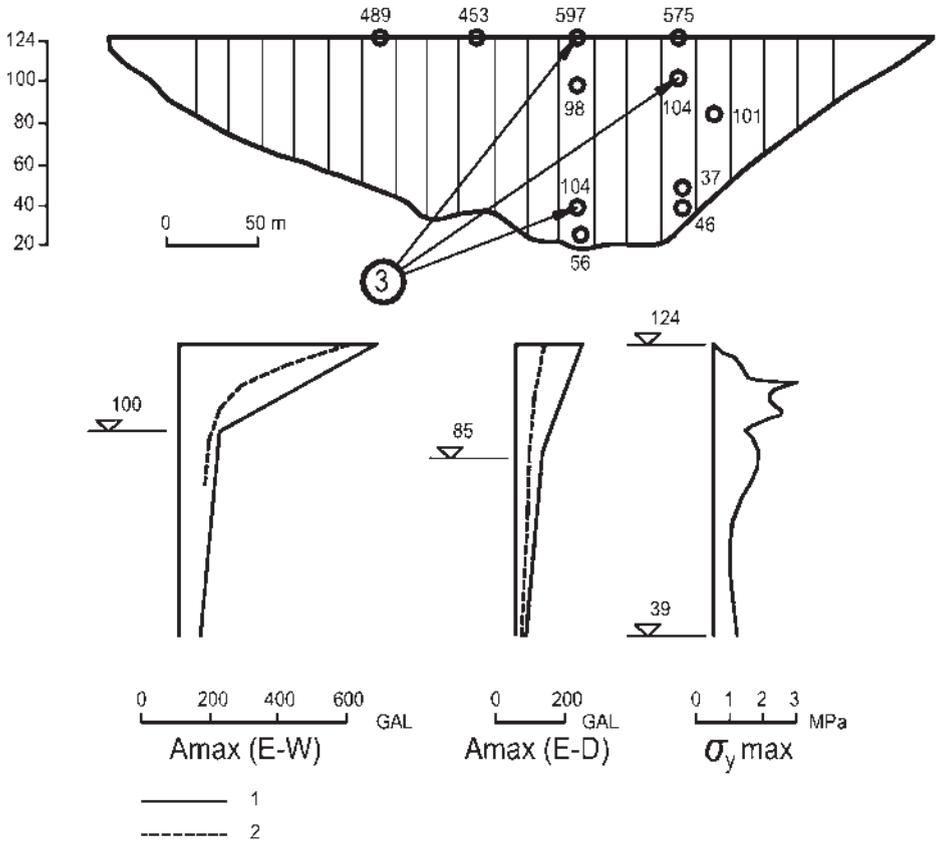


Fig. 15
 Réponse dynamique du barrage de Hsingfengkiang à l'événement sismique déclenché
 (Hsu Tsung-ho *et al.*, 1975) [17]

- 1) Valeurs observées
- 2) Valeurs calculées

- 3) Emplacements des instruments de mesure
 des grands déplacements

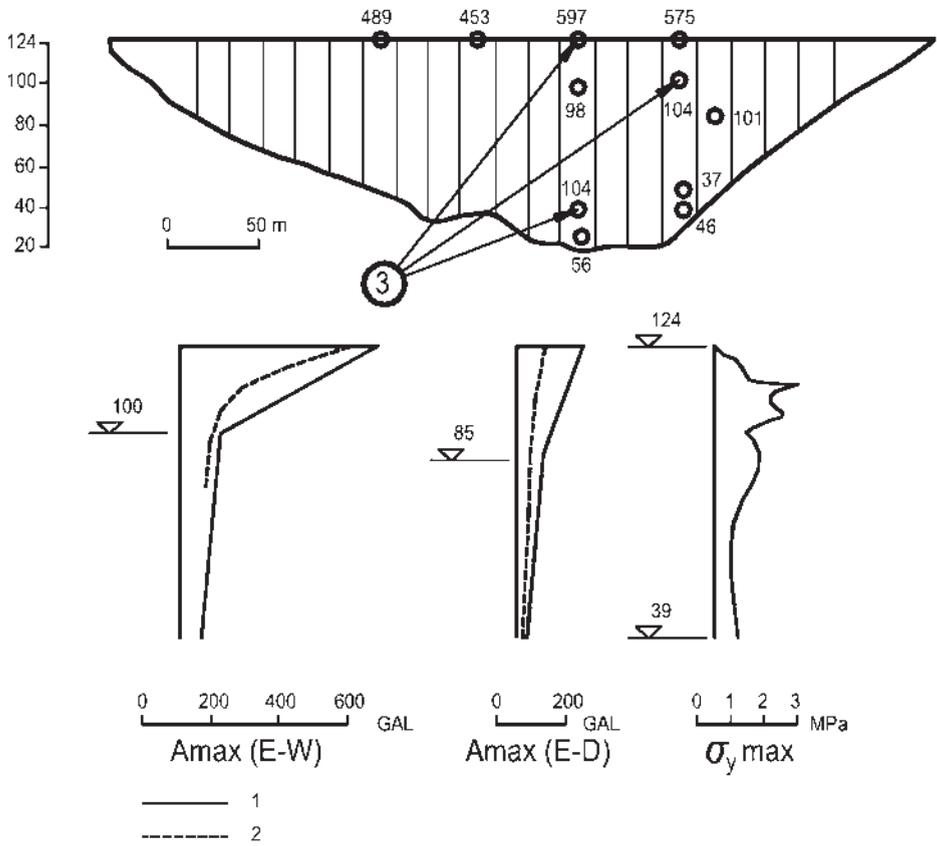


Fig. 15
 Dynamic response of Hsingfengkiang Dam to a reservoir triggered event
 (Hsu Tsung-ho *et al.*, 1975) [17]

- 1) Observed values
- 2) Calculated values
- 3) Location of strong-motion instruments

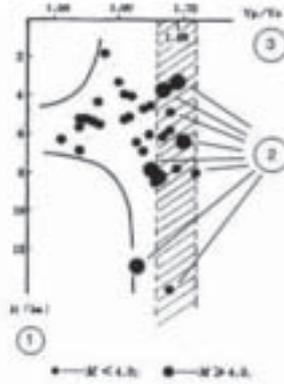
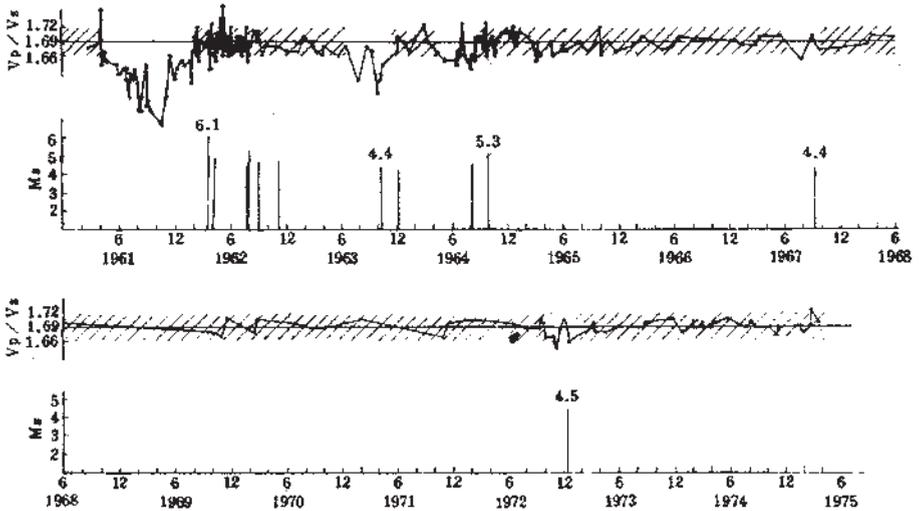


Fig. 16
Hypocentral distribution and velocity anomalies at Hsingfengkiang Dam
(Wang Miao-Yueh et al., 1975) [47]

- 1) Depth (km)
- 2) Hypocentral locations
- 3) Ratio of compression/shear wave velocities

Fig. 16 shows the distribution of detected hypocenters with depth and their relation to the measured ratio of velocities of compression and shear waves.



The variation of velocity ratio with time for the Hsingfengkiang reservoir earthquakes (February, 1961 - March, 1975).

All of those with $M_s \geq 4.3$ are indicated in the figure.

Fig. 17
Distribution in time of significant reservoir triggered shocks and of measured velocity anomalies at Hsingfengkiang Dam (Wang Miao-Yueh et al., 1975) [47]

Fig. 17 shows the time history of measured velocity anomalies and the distribution in time of shocks with magnitudes higher than 4.3. Some correlation

une certaine corrélation entre les anomalies de vitesse de la RTS et les secousses principales. Il a été suggéré que la durée des anomalies de vitesse était plus courte que dans le cas de tremblements de terre normaux. Il est possible que les anomalies de vitesse soient liées aux phénomènes de dilatance causant une diminution passagère des pressions interstitielles, qui sont rétablies postérieurement. L'anomalie de vitesse a, en fait, précédé chaque secousse principale et a été ensuite rétablie après la secousse.

Le cas de Hsingfengkiang est un des plus impressionnants parmi les phénomènes de RTS et a été intensivement discuté et documenté. Tandis que son activité déclenchée par la mise en eau était toujours en développement, le risque relatif a été bien investigué et le barrage a été sensiblement renforcé. Mais la leçon principale tirée de ce cas est donnée dans le rapport de Shen et al. (1973) [38], où les auteurs ont montré que dans l'historique de la géologie du site, les failles dans le secteur du réservoir étaient en activité, soutenues par des phénomènes réactivés le long de la vieille faille et l'existence de sources d'eau chaude. La faille de Hoyuan, de longueur significative, est située à une distance du barrage d'environ 1 km, où les épicentres sont groupés. Les mesures géodésiques ont montré un déplacement horizontal de 18,7 mm entre 1964 et 1972. Malgré la basse sismicité historique, une telle activité de faille indique que la RTS est une éventualité bien réaliste. Ceci soutient fortement la conclusion générale que des études néotectoniques et des surveillances de failles capables de produire de grands tremblements de terre doivent être effectuées en évaluant le potentiel de la RTS.

9.2. CAS DU BARRAGE DE MRATINJE

Le barrage de Mratinje est un barrage voûte d'une hauteur de 220 m construit sur le fleuve Piva en Yougoslavie. Il est situé au fond d'une gorge profonde de 1 500 m dans les montagnes de Dinaric. Le long du réservoir (60 km de longueur) les roches sont formées de calcaire triasique massif et possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. La karstification est extrêmement développée et a été considérée comme le problème principal de ce réservoir.

La tectonique est également bien active, mais aucun signe de failles quaternaires n'a été détecté. Une faille locale significative longe la rive droite du barrage, et la faille régionale principale est dans une direction parallèle à la première faille, à une distance d'environ 1 km. Cette situation tectonique est montrée à la Fig. 18.

La sismicité historique de la région du barrage et de son réservoir est modérée et a été étudiée en détail, considérant toutes les sources sismiques connues. L'évaluation finale en avait déduit que le barrage pourrait être exposé aux tremblements de terre avec une accélération au sol maximale de 0.25 g. En raison des conditions locales (barrage extrêmement haut et réservoir profond, dispositifs karstiques extrêmes et un système bien développé de failles croisant le réservoir), la RTS a été anticipée et des mesures ont été prises pour surveiller ce phénomène.

Un sismographe de courte période et de trois composantes a été installé dans un bâtiment de surveillance près du barrage (3.5 ans avant la mise en eau, à partir de 1976) et il est resté en service pendant environ 20 ans. Trois stations sismologiques de courte période ont été introduites en 1982, avec transmission radio liée au poste

between RTS velocity anomalies and main shocks can be seen. It has been stated that the duration of velocity anomalies is shorter than in the case of natural earthquakes. It is possible that the velocity anomalies are related to dilatancy phenomena causing a transient decrease in pore pressures, which are later reinstated. It was observed that the velocity anomaly preceded each main shock and was recuperated after that main shock.

The Hsingfengkiang case is one of most impressive among RTS phenomena and has been extensively discussed and documented. While its reservoir triggered activity was still in development, the related risk was understood and the dam was significantly strengthened. But the main lesson from this case is the statement by Shen et al. in their 1973 Report [38] that in recent geological time the faults in the reservoir area were active, as supported by the appearance of reactivated phenomena along the old fault planes and existence of hot springs. The Hoyuan fault of considerable length is located at a distance of about one kilometer from the dam and epicenters are clustered in this region. Geodetic measurements have shown a horizontal displacement of 18.7 mm between 1964 and 1972. In spite of low historical seismicity, such fault activity and apparent potential indicate RTS as realistic possibility. This strongly supports the general conclusion that neotectonic studies and survey of faults capable of generating large earthquakes must be included in assessing the RTS potential.

9.2. MRATINJE DAM CASE HISTORY

Mratinje Dam is a 220 m high concrete arch dam built on the Piva River in Yugoslavia. It is located at the bottom of a 1500 m deep canyon in the Dinaric Mountains. Along the whole 60 km long reservoir the ambient rocks are massive and mechanically quite competent Triassic limestone. Karstification is extremely developed and was considered the main problem for this reservoir.

Tectonics is also quite developed, but no signs of late Quaternary faulting were detected. A significant local fault crosses near the right dam abutment, and the main regional fault strikes in subparallel direction at a distance of about 1 km. This tectonic situation is presented in Fig. 18.

The historic seismicity of the dam and reservoir region is moderate and was studied in detail, considering all known seismic sources. The final assessment was that the dam might be exposed to earthquakes with a peak ground acceleration of 0.25 g. Due to ambient conditions (extremely high dam and deep reservoir, extreme karstic features and a well-developed system of faults crossing the reservoir) RTS was expected and preparations were made to monitor this phenomenon.

A three component short period seismograph was installed in a monitoring building near the dam (3.5 years prior to impounding, which started in 1976) and was operated for about 20 years. An array of three short-period seismic stations was introduced in 1982, radio linked to the central acquisition station and integrated into



Fig. 18

Schéma du réservoir du barrage de Mratinje, avec les caractéristiques tectoniques principales [11]

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 1) Rivière Piva | 4) Faille régionale principale |
| 2) Barrage de Mratinje | 5) Faille locale principale |
| 3) Retenue | 6) Failles mineures |

central et intégrées dans le réseau de surveillance sismique régional. La précision dans la définition des épicentres et des profondeurs hypocentrales était plutôt pauvre quand une seule station de surveillance fonctionnait. Pourtant, vu le grand nombre d'événements surveillés, une vue générale de la taille, du développement et du pic des événements déclenchés a pu être obtenue. Plus tard, la surveillance avec le système des stations avec transmission radio a livré des données plus précises et en temps réel. Mais la surveillance de la période de pointe (même avec une seule station) a été très importante pour l'obtention d'une image générale de l'ensemble des événements déclenchés par la mise en eau.

La sismicité du site du barrage correspondait à environ cent événements par an avec des magnitudes variant entre 1 et 3. Dans la moitié de la première année après le début de la mise en eau (1975-1976) une augmentation modérée des événements



Fig. 18
Storage layout near the Mratinje dam, with main tectonic features [11]

- | | |
|-----------------|------------------------|
| 1) Piva river | 4) Main regional fault |
| 2) Mratinje Dam | 5) Main local fault |
| 3) Storage | 6) Minor faults |

the regional seismic monitoring network. The precision of defining epicenters and hypocentral depths was rather poor while operating only one monitoring station, but due to the large number of monitored events, the general picture of size, development and peaking of triggered events was obtained. Later monitoring with a system of radio-linked stations produced more precise and real-time data. But, monitoring of the peaking period (even with only one station) was very important for the overall picture of the reservoir triggered set of events.

The background seismicity of the site was about a hundred events per year with magnitudes in the range of 1 to 3. Within the first half year after the start of the impounding (1975-1976) a moderate increase in events and magnitudes was

et des magnitudes a été observée. En 1976, le réservoir a été rempli jusqu'à 80 % de son volume maximal suite à une grande crue. Il a été par la suite complètement vidé en 1977, pour terminer les travaux de construction. Cette opération a presque triplé le nombre d'événements (273 événements ont été enregistrés pendant cette période). Par la suite, en 1978, le réservoir a été entièrement rempli jusqu'à la hauteur maximale de 220 m ; une pointe de 475 événements de la RTS a alors été enregistrée avec une magnitude maximale de 4.1. Dans les années qui ont suivi, le nombre annuel d'événements a diminué, pour atteindre le niveau correspondant à la période antérieure à la construction du barrage.

Le Tableau 2 donne une vue d'ensemble de l'activité de la RTS au barrage de Mratinje enregistrée entre 1972 et 1981.

Tableau 2

Activité RTS au barrage de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Podgorica) [35]

	72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81
N	102	77	98	129	273	475	358	247	122
M _{max}	2,55	2,8	3,0	3,5	3,5	4,1*	3,8	3,6	3,1
b				0,68	1,03	1,07	1,05	1,03	0,98
Mise en eau									

La Fig. 19 montre l'historique des niveaux d'eau et de l'émission de l'énergie sismique ($K = \log E$ en J), pendant l'année 1977/78, quand l'activité de la RTS a culminé suite à une vidange soudaine de la retenue suivie d'un remplissage brusque.

Le dégagement de l'énergie sismique dû aux phénomènes déclenchés a laissé des traces également au niveau sismique régional, couvrant le territoire du Monténégro.

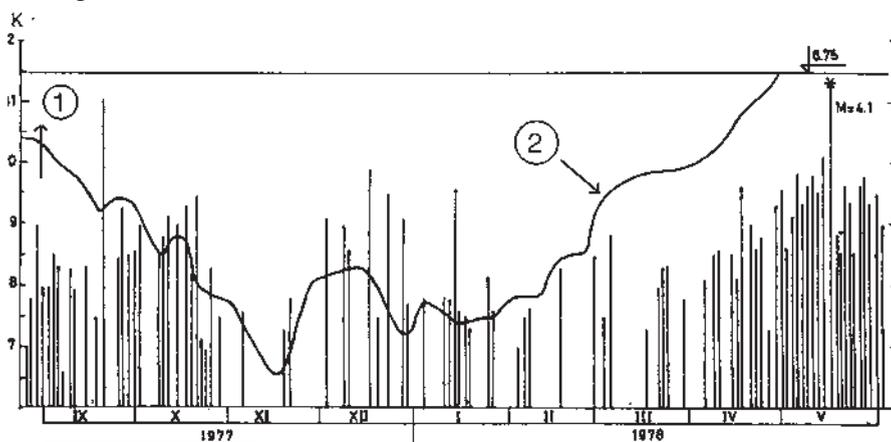


Fig. 19
Historique temporel des RTS pour les périodes de pics au barrage de Mratinje
(selon l'Institut sismologique, Podgorica) [35]

1) Émission de l'énergie sismique

2) Fluctuation du niveau de la retenue

observed. In 1976 the reservoir experienced a major flood and the reservoir was filled up to about 80% of its maximum depth and the water was completely released in 1977 to finalize the construction works for the dam. This reservoir operation nearly trebled the number of events (273 events were recorded during that period). Then in 1978 the reservoir was refilled to the full depth of 220 m and RTS peaked with 475 events in this year with a maximum magnitude of 4.1. In subsequent years, the annual number of events has decreased to the level prior to dam construction.

Table 2 gives an overview of the RTS activity at Mratinje dam, recorded from 1972 to 1981.

Table 2
RTS activity at Mratinje Dam (from Seismological Institute, Podgorica) [35]

	72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81
N	102	77	98	129	273	475	358	247	122
M _{max}	2,55	2,8	3,0	3,5	3,5	4,1*	3,8	3,6	3,1
b				0,68	1,03	1,07	1,05	1,03	0,98
Mise en eau									

Fig. 19 shows the time history of water levels and seismic energy emission ($K = \log E$ in J), for the year 1977/78, when the RTS activity culminated after sudden emptying and subsequent forced rising of the reservoir level.

The enhanced release of seismic energy due to triggered phenomena left traces also on regional seismic observation level, covering the territory of Montenegro.

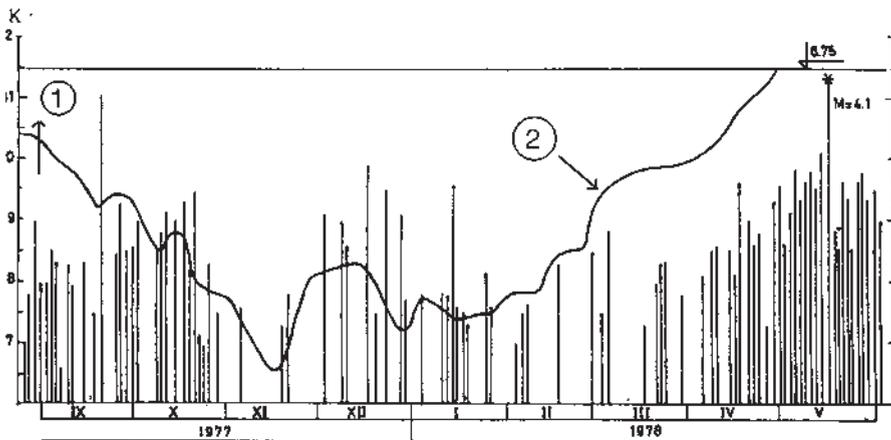


Fig. 19
Time history of RTS at peaking period at Mratinje Dam
(from Seismological Institute, Podgorica) [35]

1) Seismic energy emission

2) Storage level fluctuation

La Fig. 20 montre les magnitudes supérieures à 2,5 enregistrées par l'institut sismologique du Monténégro jusqu'à l'année 1977 (début de la rétention). La région marquée autour du réservoir de Mratinje montre une activité tout à fait modérée.

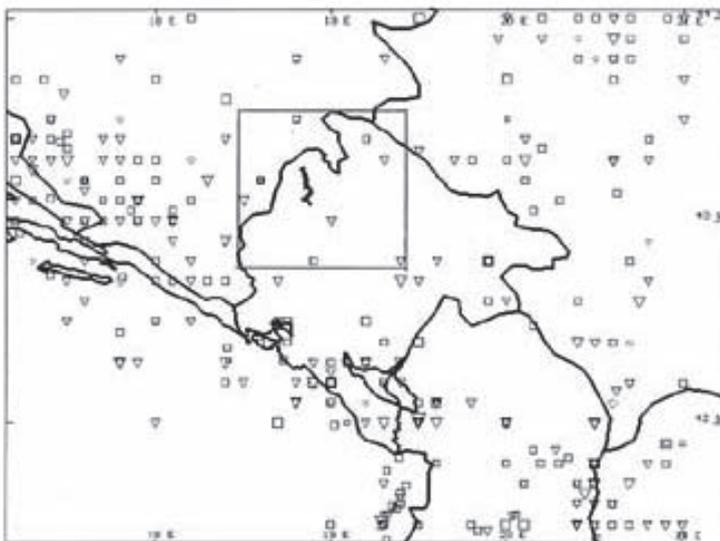


Fig. 20
Distribution des épicentres avant la mise en eau du réservoir de Mratinje
(selon l'Institut sismologique, Podgorica) [35]

La distribution des épicentres est également montrée à la Fig. 21 pendant l'année 1979, soit trois ans après la rétention et juste avant le grand tremblement de terre adriatique de la même année.

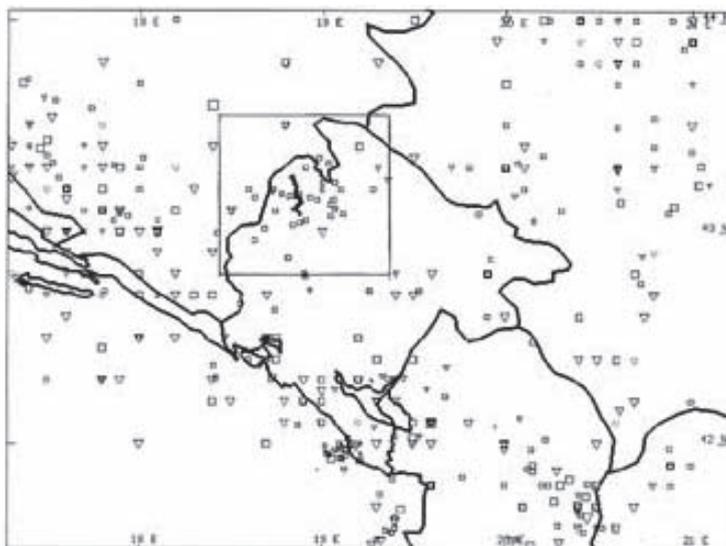


Fig. 21
Distribution des épicentres trois ans après le remplissage du bassin de Mratinje
(selon l'Institut sismologique, Podgorica) [35]

In Fig. 20, magnitudes larger than 2.5 located up to 1977 (start of impounding) by the Seismological Institute of Montenegro[35], are shown. The region marked around the Mratinje storage shows quite moderate activity.

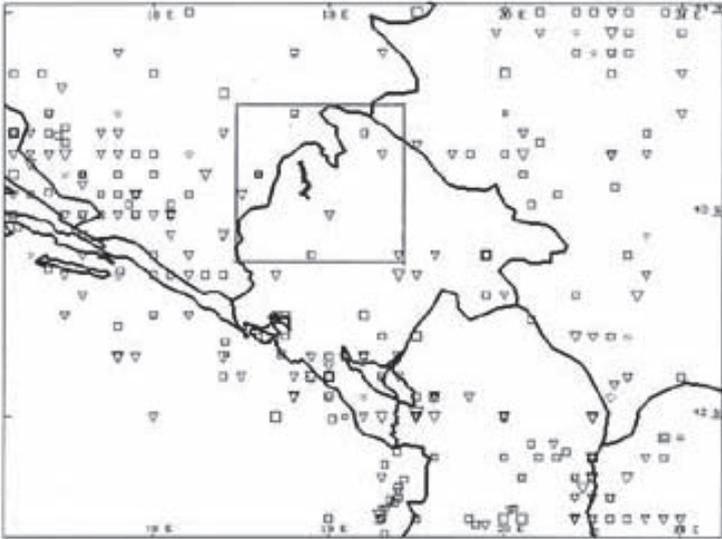


Fig. 20
Distribution of epicenters prior to impounding of Mratinje storage
(from Seismological Institute, Podgorica) [35]

The distribution of epicenters is shown also in Fig. 21 for 1979, three years after impounding and just prior to the great Adriatic earthquake in the same year.

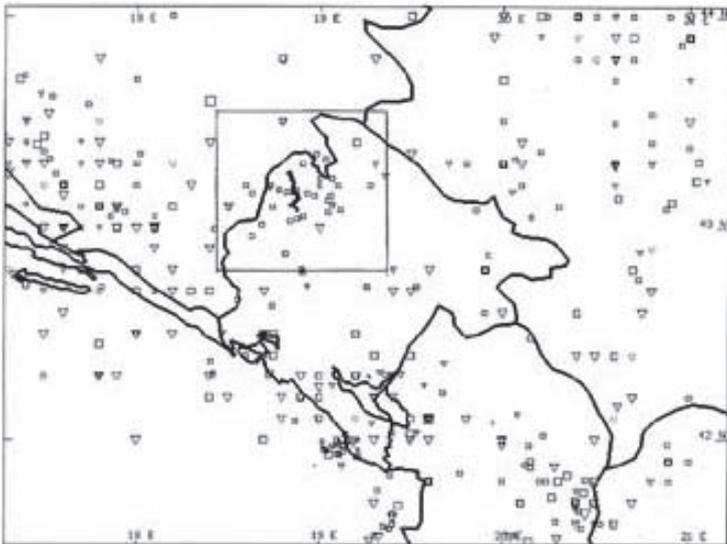


Fig. 21
Distribution of Epicenters three years after impounding of Mratinje storage
(from Seismological Institute, Podgorica) [35]

Le secteur autour de la retenue montre une forte densité des épïcèntres, confirmant ainsi les résultats de la surveillance du sismographe de courte période avec trois composantes, montré à la Fig. 19.

Le barrage de Mratinje a été équipé de six accéléromètres, cinq posés le long de la console centrale du barrage et un dans le bâtiment de surveillance. Les accéléromètres ont été équipés par un outil commun de déclenchement, qui a été placé à un niveau bas pour pouvoir saisir la réponse dynamique du barrage voûte due à un tremblement de terre de magnitude modérée. Vingt événements sismiques ont été enregistrés, la plupart du temps avec de faibles réponses du barrage.

Les accélérations maximales le long de la partie centrale sont montrées à la Fig. 22, correspondant au plus grand tremblement de terre déclenché, d'une magnitude de 4,1. Les accélérations sont significativement amplifiées au niveau de la crête du barrage (aucun dommage n'a été observé). L'atténuation était plutôt basse pour une énergie sismique relativement basse, de sorte que pour des tremblements de terre plus forts une atténuation plus élevée devrait être prévue.

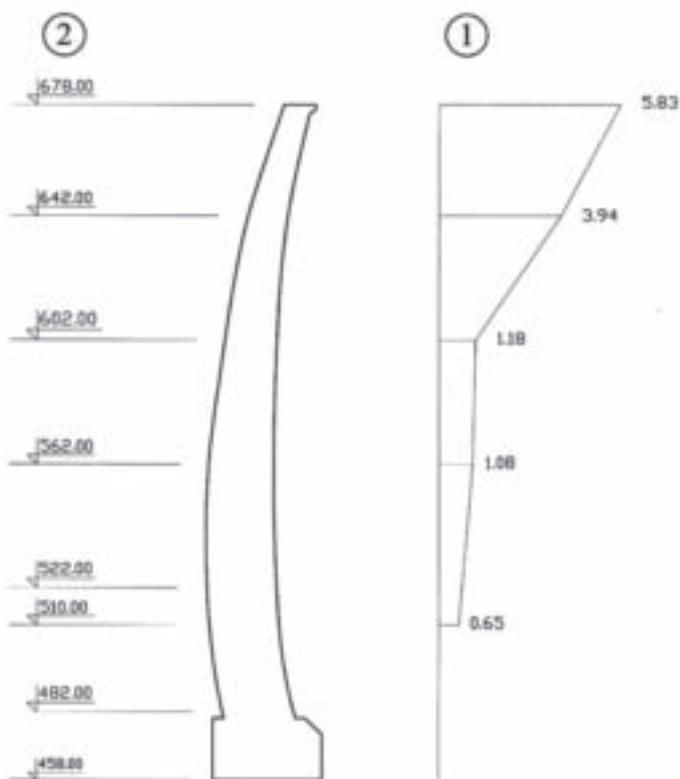


Fig. 22

Distribution des accélérations le long de la partie centrale pour des événements critiques de RTS au barrage de Mratinje (selon l'Institut sismologique, Skopje, 1987) [36]

1) Accélération en % g

2) Niveau du barrage (m)

It can be seen that the area around the storage shows a quite denser population of epicenters, supporting in this way the results of monitoring by the three component, short period seismograph shown in Fig. 19.

The Mratinje Dam was also equipped with six strong motion accelerometers, five at selected locations along the central cantilever of the dam and one in the monitoring building. The accelerometers were wired with a common trigger, which was set to a low level to be able to catch the dynamic response of the arch dam at low magnitude earthquakes. Twenty seismic events were recorded, mostly with quite low responses of the dam.

The maximum accelerations along the central cantilever are shown in Fig 22 for the largest reservoir triggered earthquake with a magnitude of 4.1. Accelerations are amplified significantly at the dam crest (no damage was observed). It should be noted that damping was rather low at relatively low seismic energy input, so that for stronger earthquakes higher damping should be expected.

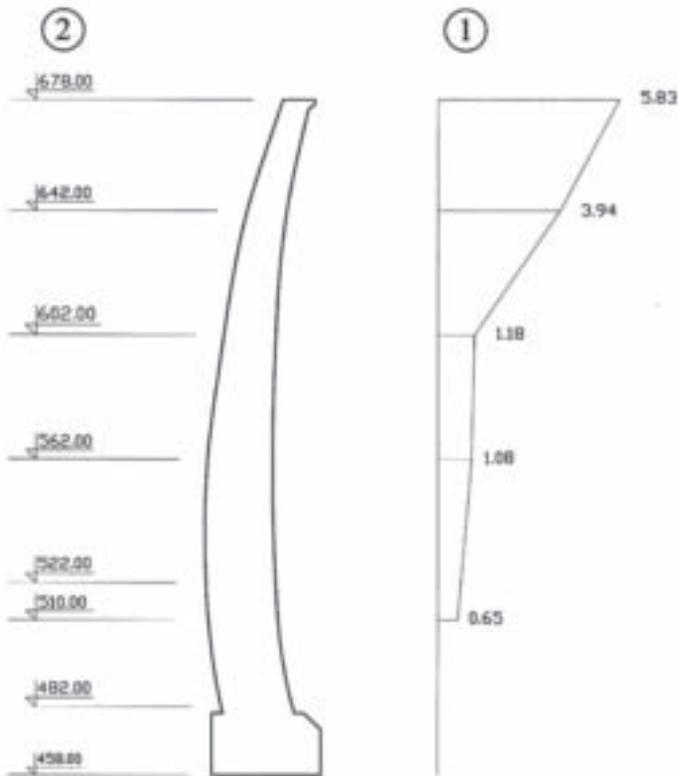


Fig. 22
Acceleration distribution along central cantilever for peaking RTS event at Mratinje Dam
(from Seismological Institute, Skopje, 1987) [36]

1) Accelerations in % g

2) Dam elevations (m)

On s'était attendu à ce que l'activité sismique retourne au niveau précédent, après une période opérationnelle du réservoir raisonnablement longue. Mais en 1994 (après 19 ans d'opération), un cycle de vidange et de remplissage du réservoir semblable à celui de 1978, mais encore plus marqué, est survenu (en raison de la demande de puissance du réseau). Ceci a provoqué des phénomènes de RTS avec une magnitude maximale de 3,8. La conclusion fut que le potentiel de RTS peut encore être déclenché par des événements extraordinaires même après une durée prolongée de service. D'ailleurs, dans les deux cas, les plus grands tremblements de terre ($M = 4,1$ de 1978 et $M = 3,8$ de 1994) se sont produits suite à des variations très rapides du niveau du réservoir.

Dans le cas du barrage de Mratinje, l'existence de failles actives et la grande profondeur d'eau du réservoir étaient des indicateurs de RTS. Une telle évaluation a été confirmée en comparant les activités avant et après la mise en eau. L'étude néotectonique fut très utile pour la compréhension des phénomènes de RTS, mais sans surveillance instrumentale, il aurait été beaucoup plus difficile (voire impossible) de suivre le développement de la RTS avec une bonne précision.

9.3. CAS DU BARRAGE DE KUROBE

Le barrage de Kurobe est un barrage voûte en forme de dôme de 186 m de hauteur, de 492 m de longueur et de 1,58 mio m³ de volume. Construit sur la rivière Kurobe en juin 1963, la surface du réservoir et sa capacité sont respectivement égales à 3,5 km² et 200 mio m³. Le corps du barrage a été construit entre les années 1959 à 1963. Le niveau de la retenue en 1960 était à la cote 1 380 m s.m. Dans les neuf années qui ont suivi, le réservoir a été rempli à des niveaux supérieurs comme prévu. Le remplissage jusqu'au niveau maximal de 1 448 m s.m. a été réalisé en 1969.

La majeure partie de la fondation du barrage est composée de granite. Des roches plutoniques telles que le porphyre de quartz, la roche hybride, la granodiorite porphyritique et le lamprophyre sont aussi présentes mais avec de faibles quantités. La terrasse et le talus se prolongent surtout sur la rive gauche.

En termes de conception sismique du barrage, la pression hydrodynamique donnée par l'équation de Westergaard's et la force d'inertie ont été considérées et calculées sur la base d'une intensité sismique horizontale de $K = 0,12$.

Les emplacements des sismographes installés dans le barrage de Kurobe sont montrés à la Fig. 23. Les instruments de mesure dynamiques du comportement du barrage de Kurobe sont divisés en deux types : le premier type consiste en des instruments de mesure d'événements microsismiques et le deuxième est conçu pour des événements sismiques. La plupart des dispositifs mentionnés ci-dessus ont été installés en 1962 et ont été placés au plus tard deux ans après le début du remplissage de la retenue, à l'exception d'une partie qui a été activée avant le remplissage de réservoir.

Les enregistrements des sismographes électromagnétiques de type Hagiwara (ci-après "HES") et ceux des microséismes sont utilisés pour vérifier et évaluer la sismicité déclenchée par la mise en eau. Les HES, composés dans ce cas par des

It was expected that the seismic activity should return to the previous ambient level, after a reasonably long period of reservoir operation. But in 1994 (after 19 years of operation) a similar but even sharper cycle of emptying and refilling of Mratinje reservoir, was realized than that experienced in 1978 (due to power requirements of the system). This caused RTS phenomena with maximum magnitudes of up to 3.8. The conclusion is that the RTS potential may still be triggered by extraordinary events even after a prolonged stretch of quieter service. Moreover, in both cases the largest earthquakes ($M = 4.1$ in 1978, and $M = 3.8$ in 1994), occurred when very rapid reservoir level variations were taking place.

In the case of the Mratinje Dam, the existence of capable faults and the large water depth were indicators for RTS. Such assessment was confirmed by comparing the pre- and post-impounding activities. The neotectonic study was most useful for understanding the RTS phenomena, but without instrumental monitoring, it would have been much more difficult (if not altogether impossible) to follow the RTS development with reasonable clarity.

9.3. KUROBE DAM CASE HISTORY

The Kurobe Dam, a 186-meter-high and 492-meter-long dome-shaped arch dam with a volume of 1.58 million cubic meters, was completed on the Kurobe River in June 1963. A reservoir area and a storage capacity are 3.5 square kilometers and 200 million cubic meters respectively. Concrete placement for the dam was conducted from 1959 to 1963. The reservoir was impounded to EL. 1,380 meters in 1960 and, in the following 9 years, the reservoir had been filled up to the higher water level in the reservoir operation than the previous year as planned. Reservoir filling to the maximum water level, EL. 1,448 meters, was achieved in 1969.

Most of the dam foundation is composed by granite. Igneous rocks such as quartz porphyry, hybrid rock, porphyritic granodiorite and lamprophyre are distributed in a small range. The terrace and the talus are extending especially in the left bank.

In terms of the seismic design for the dam, the hydrodynamic pressure given by Westergaard's equation and the inertia force were taken into account, which were computed by using the horizontal seismic intensity of $K=0.12$.

The locations of seismograph installed in the Kurobe Dam are shown in Fig. 23. The dynamic behavior measuring devices applied to the Kurobe Dam is divided to two types; one type is a measuring device for micro-seismic events, and another type is one for seismic events. Most of devices mentioned above were installed in 1962 and were set off after two years of the start of reservoir filling except some that were activated prior to the reservoir filling.

The data sets recorded by the Hagiwara electromagnetic type seismograph (hereinafter "HES") and micro-seismic meters are used to verify and evaluate the reservoir-triggered seismicity that is assumed to be caused by the occurrence of

enseurs de déplacements avec 3 composantes, étaient en service de 1963 à 1987. Ils étaient installés dans la roche profonde pour prévenir l'influence de la poussée du barrage. Les HES ont été remplacés en janvier 1988 par des instruments de microséismes qui mesurent la vitesse avec ces trois composantes. Ces derniers sont supposés être plus durables.

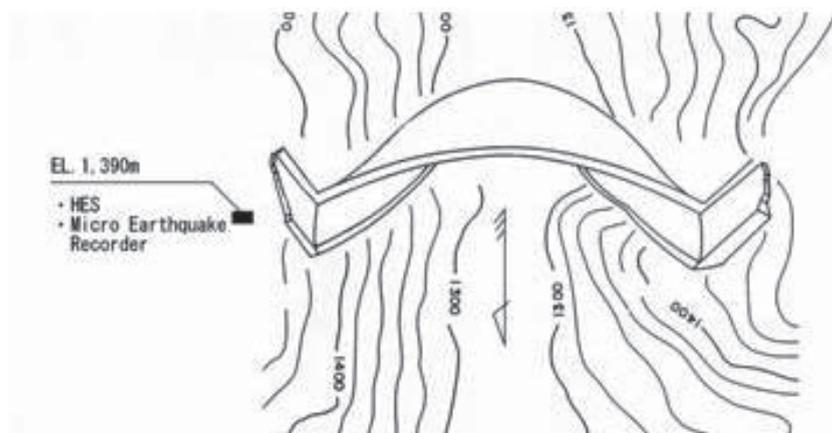


Fig. 23
Emplacement des sismographes au barrage de Kurobe

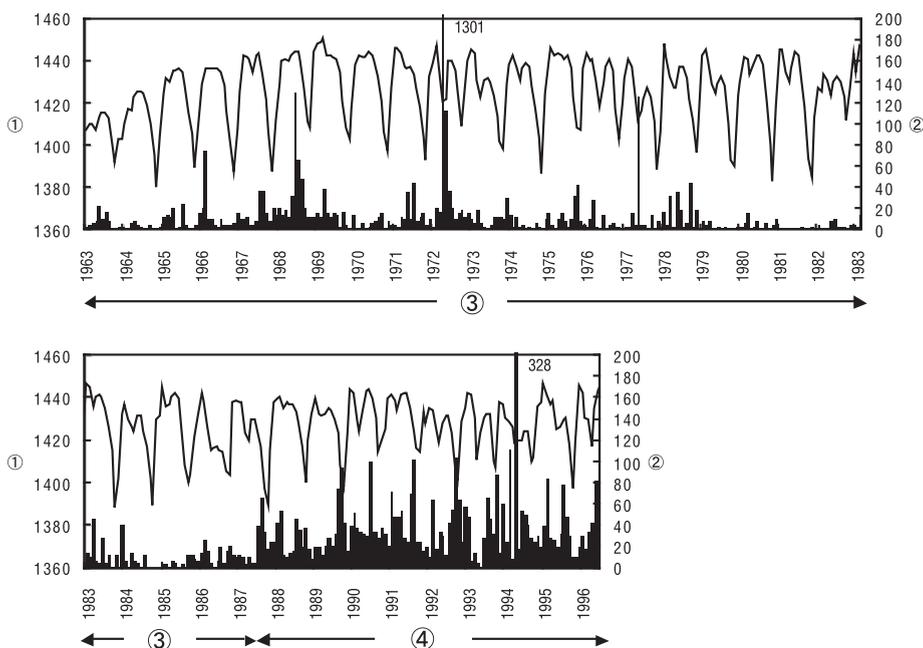


Fig. 24
Fluctuation des événements microsismiques et du niveau d'eau dans la retenue

- 1) Niveau d'eau (m)
- 2) Nombre mensuel d'événements microsismiques
- 3) HES
- 4) Instruments de mesure microsismique

reservoir. The HESs, a kind of displacement sensor with 3-componet in this case, were in use for the measurement from 1963 to 1987, which had been installed in the deep bedrock to prevent influence of the arch dam thrust. The HESs were replaced with the micro-seismic meters, an instrument to measure velocity with 3-components, in January 1988 due to the durability of the devices.

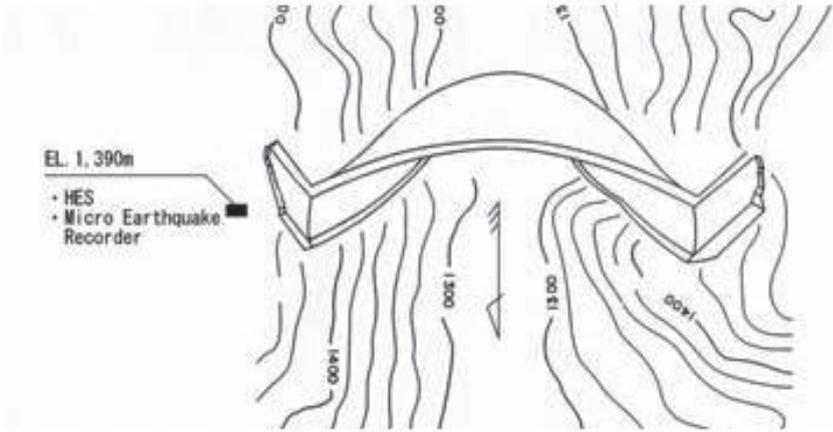


Fig. 23
Location of seismograph installed in Kurobe Dam

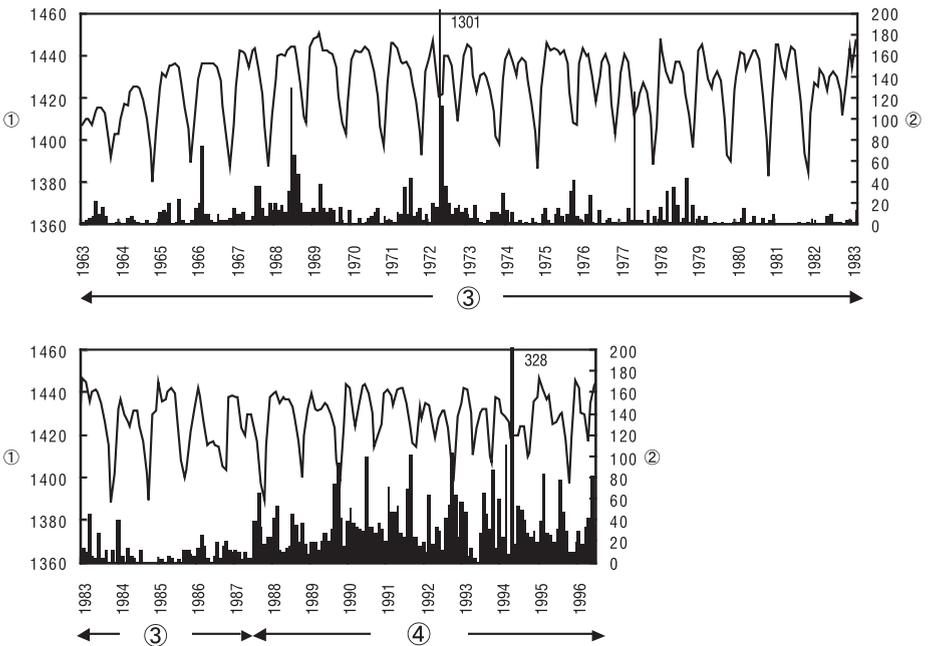


Fig. 24
Fluctuation of the seismic events and the water level of the reservoir

- 1) Water level (m)
- 2) Monthly number of micro-seismic events
- 3) HES
- 4) Micro-seismic meters

Les événements microsismiques et le niveau d'eau dans la retenue sont montrés à la Fig. 24. Les événements microsismiques choisis correspondent à des intervalles de P-S d'au moins 1,0 seconde.

Hagiwara et al. [14] ont précisé qu'il y a une corrélation entre les événements sismiques qui se sont produits près de l'emplacement de barrage et du niveau d'eau dans la retenue après leur étude des données microsismiques enregistrées pendant la période de 1963 à 1970. Le coefficient de corrélation de 0,41 calculé dans leur étude fut soigneusement examiné pour déterminer s'il représentait une bonne corrélation entre les deux phénomènes. Par conséquent, davantage d'études furent réalisées, pour vérifier le rapport entre la fréquence des événements sismique près de l'emplacement du barrage et le niveau d'eau de la retenue enregistré tous les 5 ans pendant la période de 1963 à 1996 [23]. Les coefficients de corrélation calculés dans une étude supplémentaire sont montrés à la Fig. 25. Les coefficients sont nettement dispersés dans un intervalle allant de - 0,20 à + 0.40.

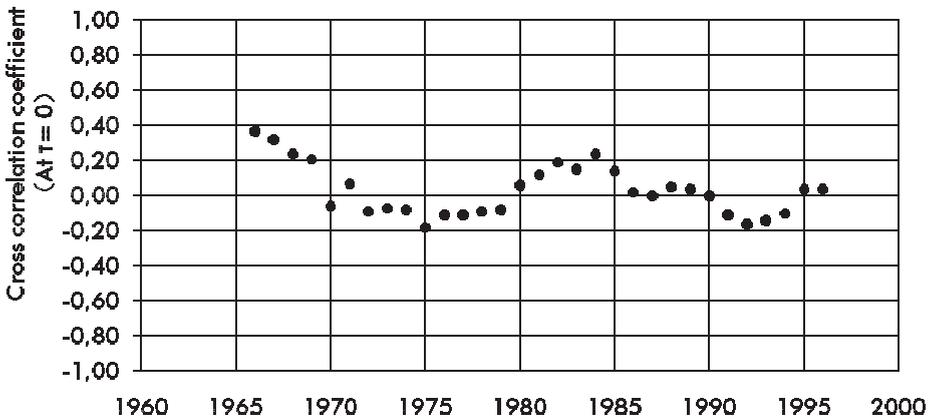


Fig. 25
Variation du coefficient de corrélation entre les événements sismiques et le niveau d'eau de la retenue du barrage de Kurobe

En outre, le rapport entre la fréquence mensuelle des événements sismiques et la moyenne mensuelle du niveau d'eau de la retenue est montré à la Fig. 26. Pour la série d'étude mentionnée ci-dessus, il est bien clair qu'il n'y a aucun rapport défini entre ces deux variables pour le cas du barrage de Kurobe.

Les événements sismiques qui ont eu lieu avant et après la construction du barrage devraient être étudiés dans ce rapport. Mais malheureusement, aucun événement sismique n'avait été enregistré avant la construction du barrage, vu que la plupart des instruments de mesure ont été installés en 1962, deux ans après le début du remplissage de réservoir. Ceci implique qu'il n'y a pas assez de données disponibles pour vérifier la différence des activités sismiques avant et après la construction du barrage, ainsi que l'influence du remplissage de la retenue. Comme alternative, les données du catalogue de tremblement de terre fourni par l'Agence Météorologique du Japon [45] peuvent être utilisées. Elles couvrent la période précédant la construction du barrage de Kurobe.

The micro-seismic events and the reservoir water level are shown in Fig 24. The micro-seismic events whose S-P intervals are equal to or less than 1.0 seconds are selected.

Hagiwara et al. [14] reported that there is a correlation between the seismic events occurred near the dam site and reservoir water level after their study on the micro-seismic data recorded during the period from 1963 to 1970. The correlation coefficient of 0.41 computed in their study should be carefully examined to determine if it can correlates between two phenomena. Therefore, further study were carried out to verify the relationship between the frequency of the seismic events occurred near the dam site and the reservoir water level recorded during the period from 1963 to 1996 every 5 years [23]. The cross correlation coefficients computed in the further study are shown in Fig. 25. The coefficients are scattered in the range from plus 0.40 to minus 0.20.

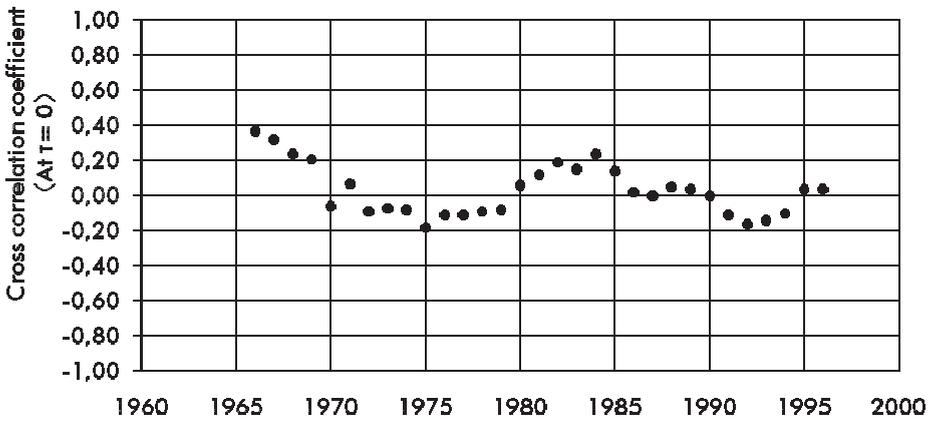


Fig. 25
Variation of cross correlation coefficient between seismic events and the water level of the reservoir of Kurobe Dam

In addition, the relationship between the monthly frequency of the seismic events and the monthly average of the reservoir water level is shown in Fig. 26. It is clear that there is no definite relationship between two phenomena in case of the Kurobe Dam based on a series of the study mentioned above.

And seismic events occurred before and after the dam construction should be studied in this report but, unfortunately, no seismic events had been recorded before the dam construction because most of the devices were installed in 1962, two years after the start of reservoir filling. It means that there are not enough data sets available to verify the difference of the seismic activities before and after the dam and reservoir construction. As an alternative way, the data sets of the earthquake catalogue provided by the Japan Meteorological Agency [45] can be used to make it clear, which covers the period even before the construction of the Kurobe Dam.

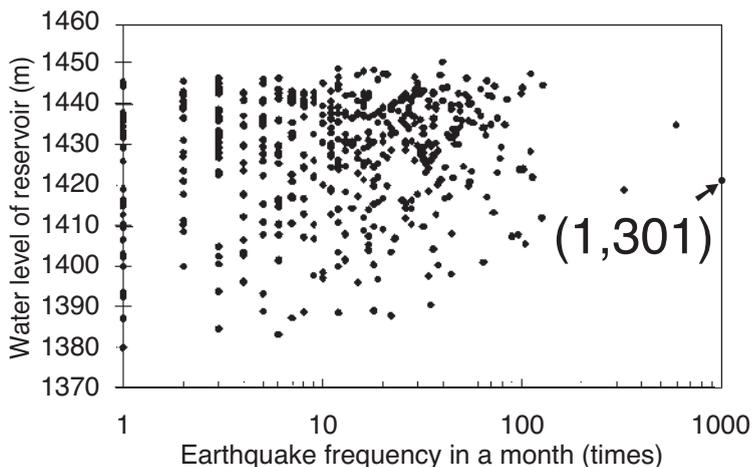
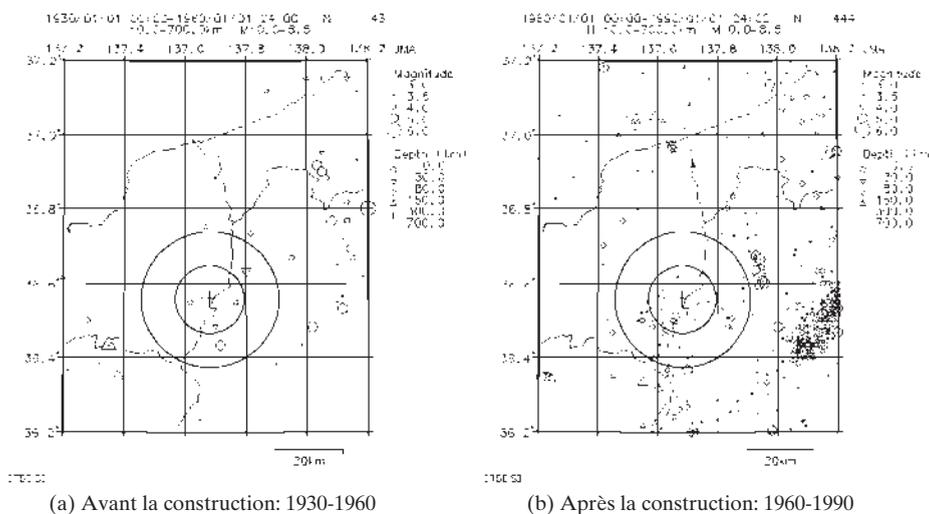


Fig. 26
Relation entre la fréquence mensuelle des événements sismiques et le niveau d'eau de la retenue du barrage de Kurobe

Les événements sismiques enregistrés avant et après la construction du Barrage de Kurobe sont montrés à la Fig. 27. Un tremblement de terre d'une magnitude supérieure à 3,0 a été détecté dans le secteur proche du barrage et du réservoir avant la construction. Aucune tendance à l'augmentation des événements sismiques ne pourrait être confirmée dans ce cas-ci. À la Fig. 27, le nombre d'événements sismiques détectés entre 1960 et 1990 est montré et comparé aux années avant la construction. Cet accroissement est en fait essentiellement dû à l'amélioration continue des appareils de mesure.



(a) Avant la construction: 1930-1960

(b) Après la construction: 1960-1990

Fig. 27

Données sur les tremblements de terre avant et après la construction du barrage de Kurobe (Agence Météorologique du Japon)

- 1) Latitude
- 2) Longitude

- 3) Magnitude
- 4) Profondeur (m)

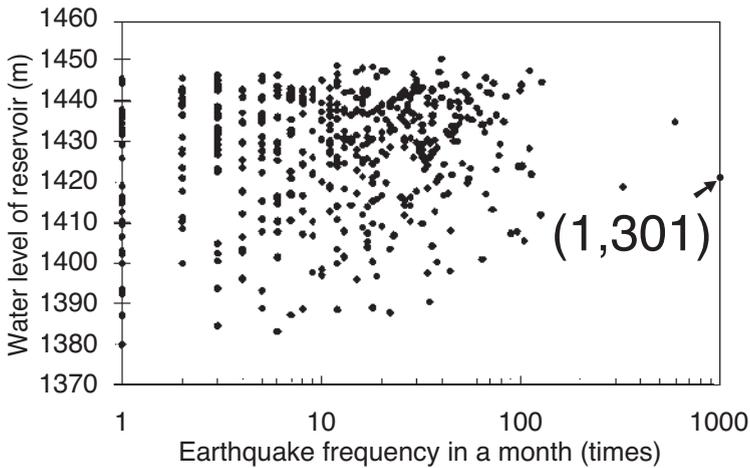


Fig. 26
Relation between the monthly frequency of seismic events
and the water level in the reservoir of Kurobe Dam

Seismic events recorded before and after the construction of the Kurobe Dam are shown in Fig. 27. The earthquake with magnitude more than 3.0 had been detected in the area close to the dam and the reservoir before the construction and no definite trend of increasing the seismic events can be found out in this case. In Fig. 27, numbers of the seismic events had been detected during 1960 to 1990 in comparison with before the construction. It is because of the highly improved performance of the measuring devices.

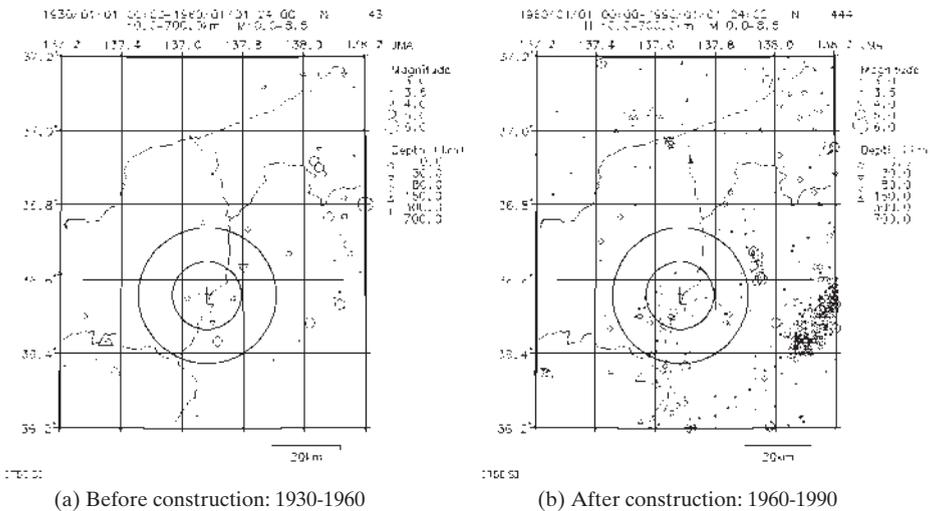


Fig. 27
The earthquake data before and after the Kurobe Dam
construction (Japan Meteorological Agency)

- 1) Latitude
- 2) Longitude

- 3) Magnitude
- 4) depth (m)

En conséquence, il est possible de conclure que le Barrage de Kurobe n'a pas causé les événements sismiques déclenchés par la mise en eau.

9.4. CAS DU BARRAGE DE TAKASE

Le Barrage de Takase, est une digue en enrochement de 176 m de hauteur, 362 m de longueur et 11,59 mio m³ de volume de remblais. Construit sur la rivière de Takase, il a été achevé en décembre 1978. La superficie de son réservoir et la capacité de retenue sont respectivement égale à 1,78 km² et 76,2 mio m³. Le corps du barrage a été réalisé entre 1973 et 1977, et la mise en eau a eu lieu entre décembre 1978 et novembre 1979. La surveillance des microséismes proches du réservoir a été mise en place en janvier 1975, alors que le barrage était en phase de construction. Elle s'est effectuée pendant 15 années afin d'étudier la manière selon laquelle la création d'un réservoir si profond affecterait l'activité sismique dans la région. Le bassin versant du barrage de Takase est entouré par des hautes montagnes, d'altitude allant de 2 600 à 3 000 m. La roche est constituée principalement de granite formé après la période jurassique et elle est pénétrée ou couverte par la porphyrite, le porphyre de quartz et l'andésite.

La Fig. 28 montre l'occurrence mensuelle des tremblements dont l'intervalle S-P était inférieur à une seconde. Les Figs. 29 (a), (b) et (c) montrent la distribution hypocentrale des tremblements de terre mesurés respectivement avant, durant et après la mise en eau.

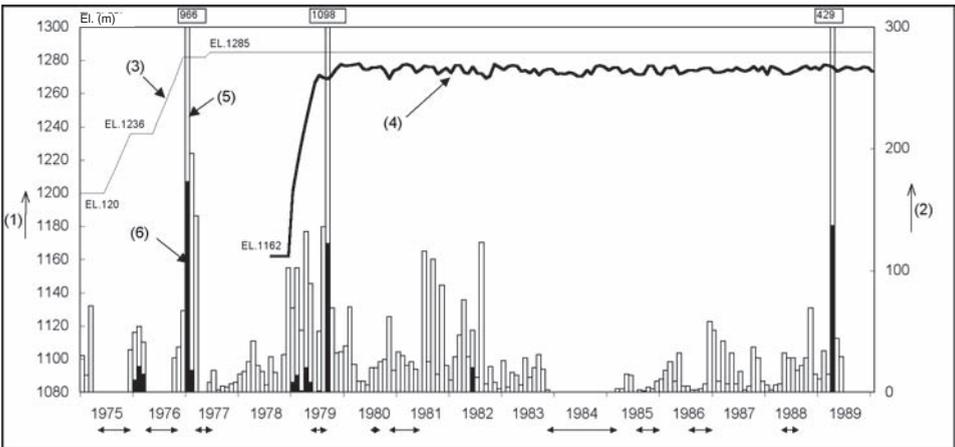


Fig. 28

Changement temporel de l'occurrence mensuelle des événements sismiques au barrage de Takase

- | | |
|---|--|
| 1) Élévation (m) | 4) Niveau d'eau du réservoir |
| 2) Nombre de tremblements de terre (par mois) | 5) Nombre de tremblements de terre (observé) |
| 3) Élévation du remblayage | 6) Essaim de séismes |

←→ Période durant laquelle la sensibilité était réduite ou les observations étaient interrompues

As a result, it can be concluded that the Kurobe dam has not caused the reservoir triggered seismicity events.

9.4. TAKASE DAM CASE HISTORY

The Takase Dam, a 176-meter-high, 362-meter-long rockfill dam with a volume of 11.59 million cubic meters, was completed on the Takase River in December 1978. The reservoir surface area and storage capacity are 1.78 square kilometers and 76.2 million cubic meters respectively. The embankment was built from 1973 to 1977, and impounding of the reservoir took place between December 1978 and November 1979. Micro-earthquake observations around the reservoir began in January 1975, while the dam was still under construction, and continued for 15 years in order to investigate how the creation of such a deep reservoir would affect the seismic activity in the crust. The catchment area of the Takase Dam is surrounded by 2,600 to 3,000-m high mountains. The area consists mainly of granite formed after the Jurassic period and is penetrated or covered by porphyrite, quartz porphyry and andesite.

Fig. 28 shows the monthly occurrence rate of earthquakes whose s-p time was less than 1 second. Figs 29 (a), (b) and (c) show the hypocentral distributions of the observed earthquakes before, during and after impounding of the reservoir, respectively.

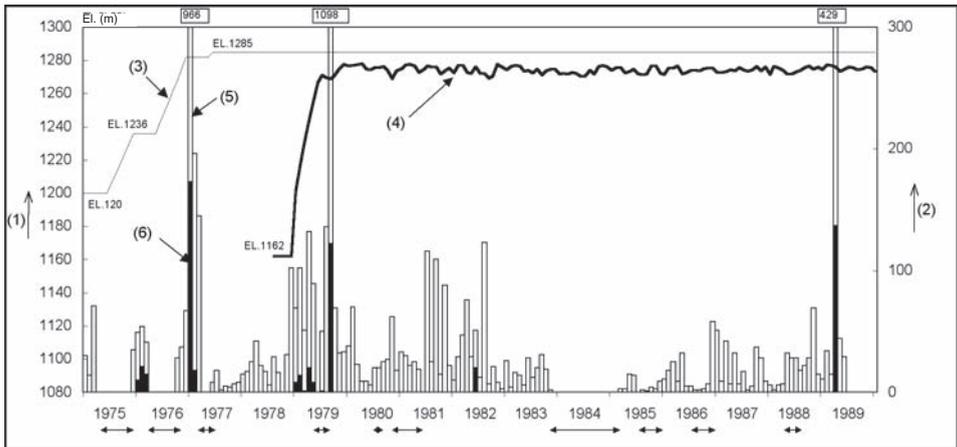


Fig. 28
Temporal change of monthly occurrence rate of seismic events at Takase dam

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1) Elevation (m) | 4) Reservoir water level |
| 2) Number of earthquakes (per month) | 5) Number of earthquakes (observed) |
| 3) Embankment elevation | 6) Earthquake swarms |

↔ Periods during which sensitivity was lowered or observation was interrupted

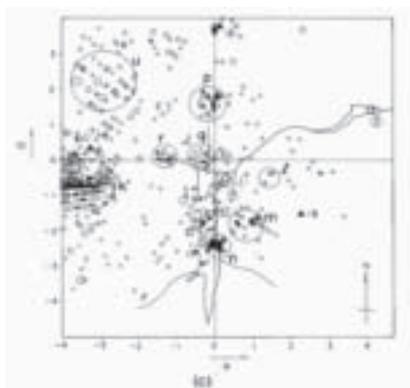
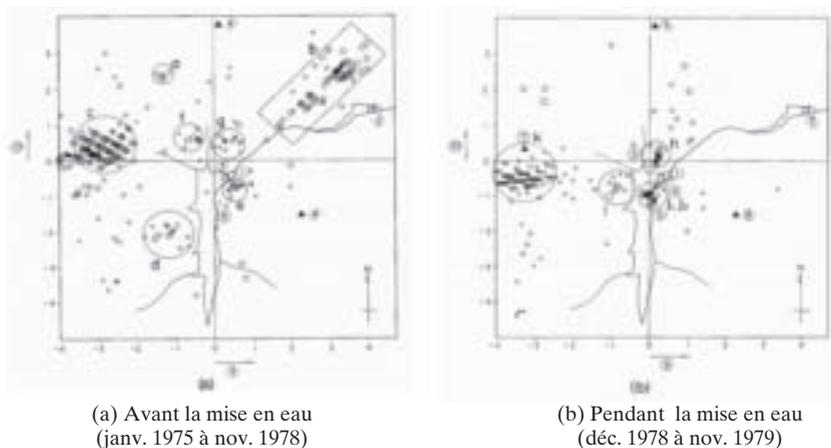


Fig. 29

Distribution hypocentrale des événements sismiques dans la région du barrage de Takase

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1) Barrage de Takase | 7) Mont Eboshidake |
| 2) Barrage de Nanakura | 8) Mont Karasawadake |
| 3) P1: sismographe | 9) Distance E-O |
| 4) P2: sismographe | 10) Distance N-S |
| 5) P3: sismographe | a-u: Essaim de séismes |
| 6) Mont Funakubodake | |

Les résultats de la surveillance sont donnés ci-dessous :

I. *Avant la mise en eau* : un essaim de séismes a été observé aux hypocentres à des profondeurs de 2 à 4 km. La magnitude maximale était de 2,8, mesurée au niveau de l'essaim C près du Mont Eboshidake.

II. *Pendant la mise en eau* : des essaims de séismes avec des hypocentres peu profonds (0,2 à 3,4 km) ont été observés en 1979, pendant la période durant laquelle le niveau d'eau du réservoir a monté brusquement juste après le début de la rétention. Il s'agissait de microséismes avec une magnitude maximale de 2,3.

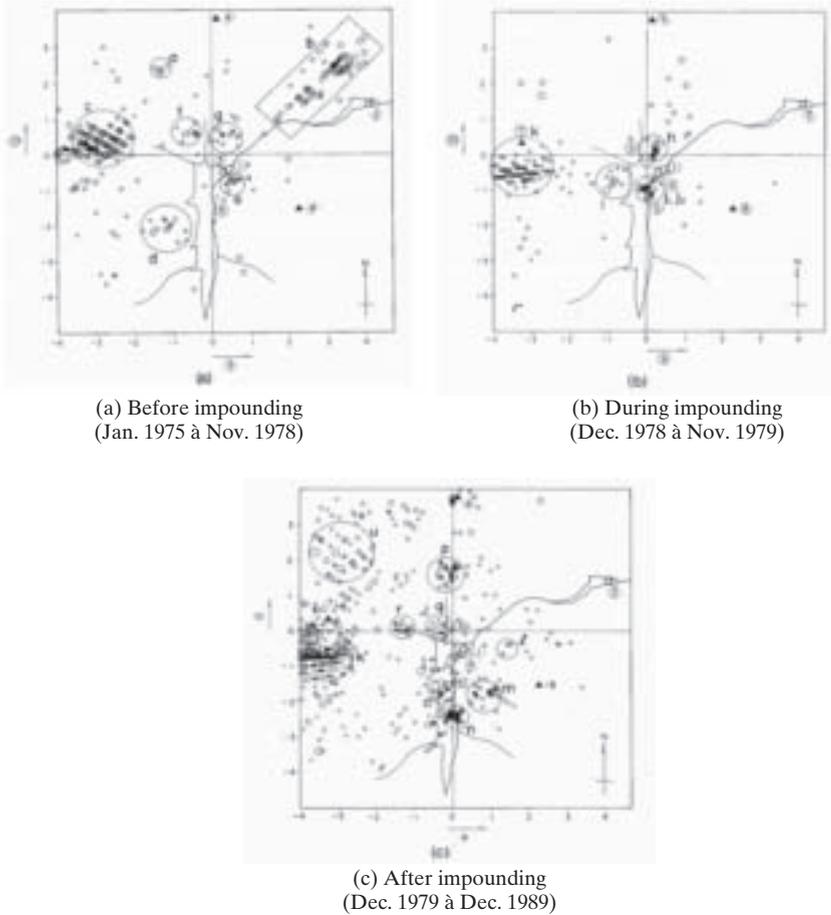


Fig. 29
Hypocentral distribution (plan) of seismic events in Takase Dam region

1) Takase Dam	7) Mt. Eboshidake
2) Nanakura Dam	8) Mt. Karasawadake
3) P1: seismometer	9) E-W distance
4) P2: seismometer	10) N-S distance
5) P3: seismometer	a-u: Earthquake swarms
6) Mt. Funakubodake	

The results of monitoring are summarized below:

I. *Before impounding*: Marked earthquake swarm activity was observed, all of which had hypocenters at depths of 2 to 4 km. The maximum magnitude during this period was 2.8, observed in Swarm C near Mt. Eboshidake.

II. *During impounding*: Earthquake swarms having extremely shallow hypocenters (0.2 to 3.4 km) were observed in 1979, during the period when the reservoir water level rose sharply immediately after the commencement of impounding. These were micro-earthquakes with a maximum magnitude of 2.3.

III. *Après la mise en eau* : sept essais de séismes ont été observés entre décembre 1979 et juin 1983. Les profondeurs hypocentrales se sont étendues entre 1,5 et 6,0 km avec une magnitude maximale de 2,7. Un autre nouvel essai (Fig. 29c) a été observé en décembre 1986 et octobre 1987 avec une magnitude maximale de 3,6.

Des formes d'onde typiques ont été choisies parmi les essais de séismes observés avant, pendant et après la mise en eau, et les spectres sources des ondes P et S ont été estimés afin de vérifier si la mise en eau du réservoir avait eu un effet sur le mécanisme de la génération de séismes.

La Fig. 30 montre les fréquences de coupure, les moments sismiques et les chutes de contraintes avant, pendant et après la mise en eau.

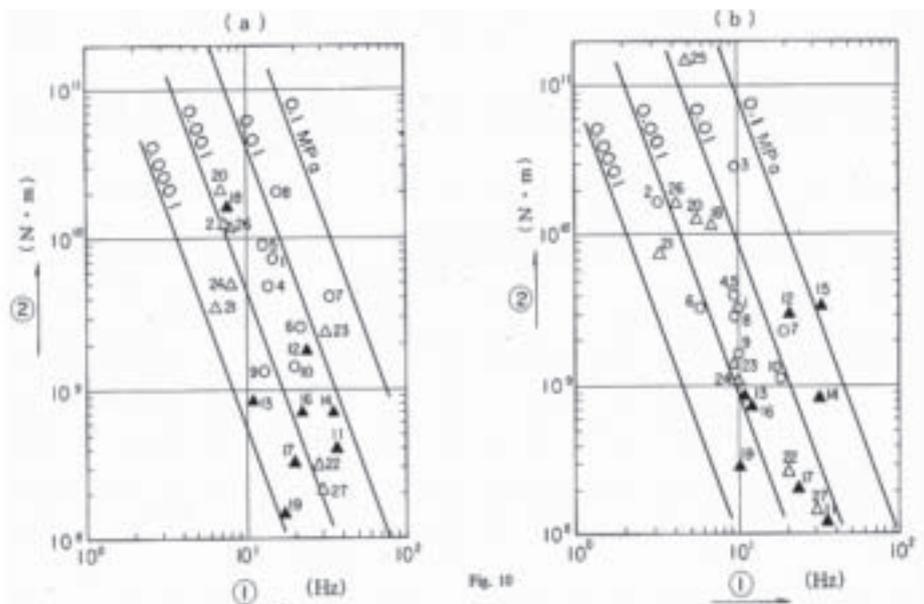


Fig. 30
Fréquences de coupure, moments sismiques et chute de contrainte

(a) Onde P

(b) Onde S

1) Fréquence de coupure

○ tremblement de terre avant la mise en eau

△ tremblement de terre après la mise en eau

2) Moment sismique

▲ tremblement de terre pendant la mise en eau

Il est difficile d'identifier des différences entre les spectres sources des tremblements de terre avant, pendant et après la mise en eau.

9.5. CAS DU BARRAGE DE POECHOS

Le Barrage de Poechos se trouve sur le fleuve Chira, près de la frontière nord du Pérou, dans la région au pied des Andes. L'emplacement n'est pas loin de la faille frontalière du Pacifique, c.-à.d. de la zone de subduction de la plaque de Nasca

III. *After impounding*: Seven earthquake swarms were observed between December 1979 and June 1983. The hypocentral depths ranged between 1.5 and 6.0 km and their maximum magnitude was 2.7. Another new swarm was observed (in Fig.29 c) in December 1986 and October 1987 and the maximum magnitude was 3.6.

Typical waveforms were selected from the swarm earthquakes observed prior to, during and after the impounding, and their P-wave and S-wave source spectra were estimated in order to investigate whether the impounding of the reservoir had had an effect on the mechanism of earthquake generation.

Fig. 30 shows the corner frequencies, seismic moments and stress drops before, during and after impounding.

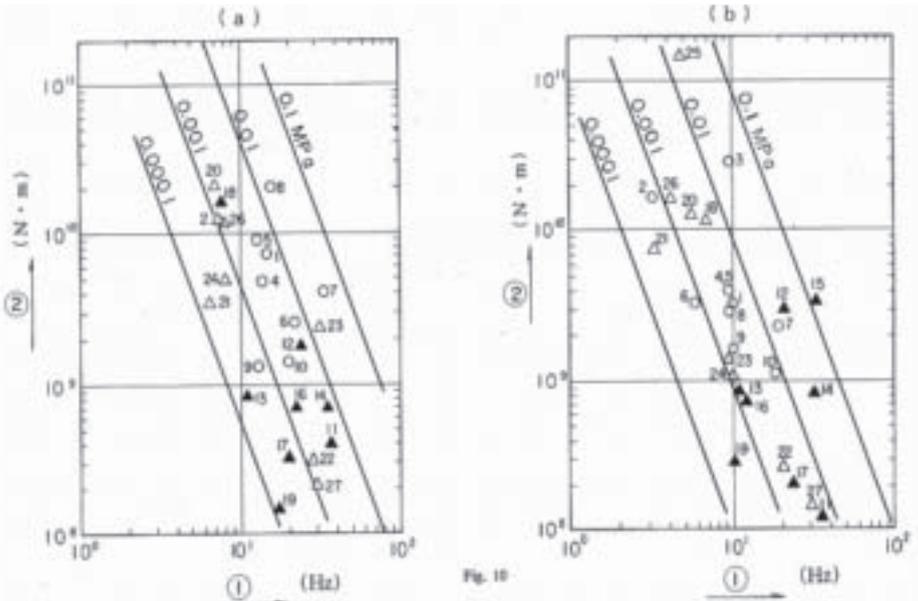


Fig. 30
Corner frequencies, seismic moments and stress drops

(a) P waves

(b) S waves

1) Corner frequency

○ earthquake before impounding

△ earthquake after impounding

2) Seismic moment

▲ earthquake during impounding

It is difficult to identify differences in source spectra among the earthquakes before, during and after impounding.

9.5. POECHOS DAM CASE HISTORY

The Poechos Dam is on the Chira River, near the northern border of Peru, in the piedmont region of the Andes. The site is not far from the Pacific border fault, i.e. from the subduction zone of the Nasca plate below the continent. The reservoir

au-dessous de la plaque continentale. Le réservoir a un volume d'environ 1 km^3 et la longueur de la crête du barrage est d'environ 10 km . C'est un barrage en remblais constitué de roches et de graviers avec un noyau central d'argile de 50 m de hauteur. Dans sa large partie centrale, le barrage est fondé sur une couche alluviale épaisse avec une profondeur maximale d'environ 80 m . Par conséquent, le barrage est sensible à l'amplification locale du mouvement de base. La sismicité tectonique normale est très haute dans la région côtière et des mouvements significatifs de la fondation ont été prévus à l'emplacement du barrage. Ainsi, ce barrage a été conçu pour une accélération au sol maximale de $0,4 \text{ g}$ (Bozovic et autres, 1979) [6]. Des déformations relativement grandes du barrage et la possibilité de fissures ont été admises. Dans ces conditions, il était nécessaire de surveiller la possibilité de la RTS, bien qu'il ait été prévu que l'activité tectonique de fond de la région relativement élevée pourrait masquer la RTS.

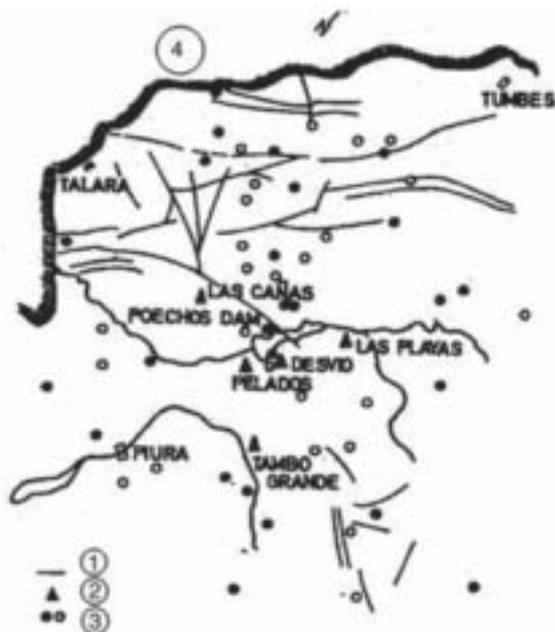


Fig. 31
Schéma du réseau de contrôle des RTS pour le barrage de Poechos au Pérou
(selon l'Institut sismologique du Pérou, Lima, 1973) [26]

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1) Failles | 3) Epicentres |
| 2) Stations sismiques | 4) Océan Pacifique |

Le barrage a été équipé de quatre séismographes. La région du barrage et du réservoir a été surveillée par un choix de cinq stations sismologiques de courte période, qui ont été reliées à une station centrale d'enregistrement par radio.

La Fig. 31 montre la disposition du réseau de surveillance de la RTS, avec la position des cinq stations de surveillance de courte période et une représentation schématique des failles régionales principales. Le réservoir est intersecté par la grande faille régionale de Huayapira, qui est reliée à la faille Pacifique frontalière.

has a volume of approximately 1 km³ and the crest length of the dam is about 10 kilometers. It is a rock and gravel fill dam with a central clay core, 50 m in height. But in the wide central part the dam is founded on thick alluvial layer with a maximum depth of about 80 m. Therefore, the dam is sensitive to local amplification of ground motion. The natural tectonic seismicity is very high in the coastal region and considerable maximum ground motions at the dam site were expected, so that the dam was designed for a peak ground acceleration of 0.4 g (Bozovic et al., 1979) [6]. Relatively large dam deformations and the possibility of cracks had to be accepted. Under the described conditions, it was considered necessary to monitor the possibility of RTS, although it was kept in mind that relatively high background tectonic activity of the region might mask the RTS.

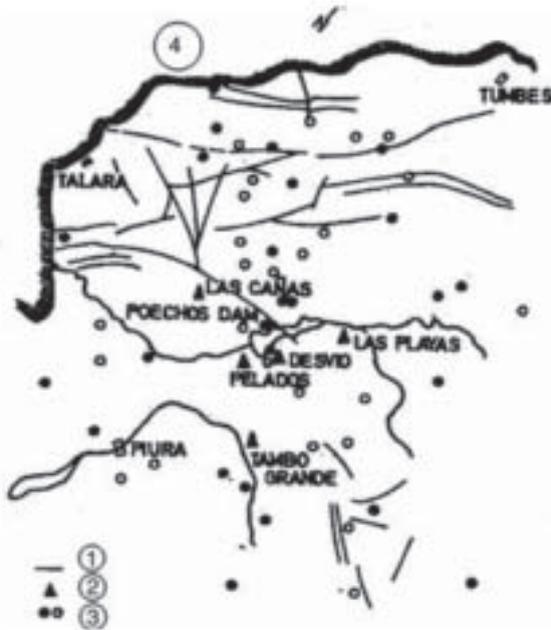


Fig. 31
Layout of RTS monitoring array for Poechoos dam in Peru
(from Seismological Institute of Peru, Lima, 1973) [26]

- | | |
|---------------------|------------------|
| 1) Faults | 3) Epicentres |
| 2) Seismic stations | 4) Pacific Ocean |

The dam was equipped with four strong motion instruments. The dam and reservoir region were monitored by an array of five short period seismic stations, which were linked to a central recording station by radio.

Fig. 31 shows the layout of the RTS monitoring array, with positions of five short-period monitoring stations and a schematic presentation of the main regional faults. It can be noted that the reservoir is intersected by the large regional Huayapira fault, which connects with the bordering Pacific fault.

La Fig. 32 présente une section représentative des résultats de la surveillance, montrant les fluctuations du niveau du réservoir et le nombre de secousses enregistrées.

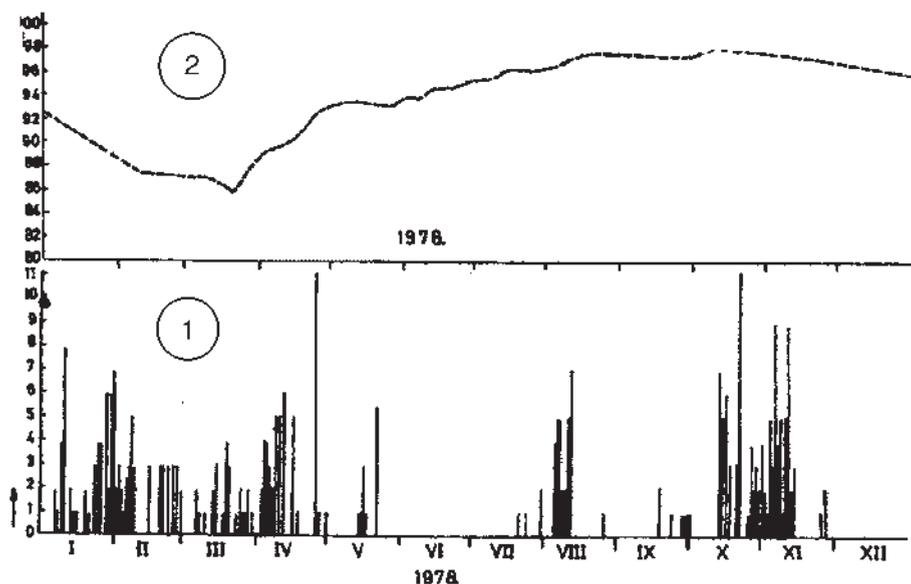


Fig. 32

Partie représentative des résultats du contrôle du barrage de Poechos
(selon l'Institut sismologique du Pérou, Lima 1979) [26]

- 1) Fluctuation du niveau de la retenue 2) Nombre de secousses enregistrées

La distribution des épicentres observés est approximativement dispersée sur tout le secteur surveillé et les mesures d'activité sismique n'indiquent pas un rapport particulier de cause à effet avec la mise en eau du réservoir de Poechos. Le barrage a été en service durant plus de 25 ans et aucun événement sismique significatif n'a été enregistré. Il a été conclu que dans le cas du réservoir de Poechos, aucune RTS n'a pu être démontrée.

Les cas présentés ci-dessus illustrent la nature et l'ampleur des informations qui peuvent être obtenues suite à la surveillance de la RTS. Du fait que des essais directs appropriés à des profondeurs sismogéniques semblent être impossibles à réaliser, du moins dans le futur proche, la surveillance des phénomènes de RTS est le meilleur moyen pour obtenir des informations complémentaires. Cette approche devrait être maintenue et développée par toutes les entités intéressées, particulièrement par les concepteurs de barrages et les propriétaires. Une présentation plus large de cas enregistrés et commentés serait fort intéressante.

Fig. 32 shows a representative section of monitoring results, displaying reservoir level fluctuations and the number of recorded shocks.

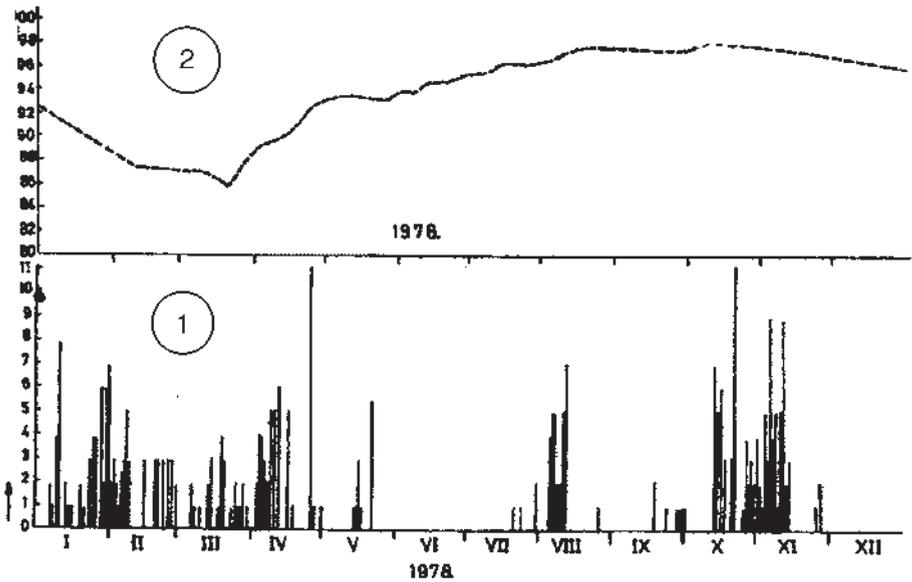


Fig. 32
 Representative section of monitoring results for Poechos dam
 (from Seismological Institute of Peru, Lima 1979) [26]

- 1) Reservoir level fluctuations
- 2) Number of recorded shocks

It can be seen that the distribution of observed epicenters are dispersed over nearly all of the monitored area and the activity records do not indicate a special triggering link with the impounding of the Poechos reservoir. The dam has been in service for more than 25 years and no significant seismic event has been recorded. It was therefore concluded that in the Poechos reservoir case, there was no discernible RTS.

The presented Case Histories illustrate the nature and extent of information that can be obtained by RTS monitoring. Since significant direct testing at seismogenic depths seems to be out of question, at least for the foreseeable future, monitoring of RTS phenomena is the best means to obtain further data on RTS. This trend should be followed and actively developed by all interested entities, especially by dam designers and owners. A wider presentation of recorded and commented Case Histories, would be of considerable interest.

10. ÉVALUATION DU POTENTIEL ET CONTRÔLE DE LA SISMICITÉ DÉCLENCHÉE PAR UNE RETENUE

Pratiquement n'importe quel grand barrage, et particulièrement les barrages de très grande hauteur, sont des candidats potentiels à une RTS. Afin d'évaluer ce potentiel, il est nécessaire d'investiguer les données suivantes :

- conditions et données tectoniques sur la géologie structurale, étayées par l'étude de photographies aériennes et d'images satellite ;
- données macrosismiques pertinentes de la retenue en question ;
- informations détaillées sur les failles actives dans une région plus large, et particulièrement toutes les données disponibles sur l'activité récente des failles dans la région du barrage et de la retenue ;
- évaluation du potentiel sismique de toutes les failles connues dans la région du barrage et de la retenue ;
- régimes des eaux souterraines.

En conclusion, une étude complète néotectonique dans la région d'intérêt est nécessaire pour l'évaluation du potentiel de la RTS d'un barrage. À cet égard, le bulletin 112 de la CIGB « Néotectonique et barrages » (1998) [18] contient des directives de valeur.

Un dispositif très utile serait l'étude systématique des territoires en utilisant les images satellite et le GPS de surveillance, de sorte que l'information tectonique et néotectonique de base et les informations générales sur la mobilité de la croûte et l'activité des failles soient disponibles. Une telle information serait de grande valeur pour des études préliminaires et détaillées.

Sur la base de telles données, il est possible d'évaluer le risque de la RTS. L'évaluation fiable de l'importance de tels événements dépend fondamentalement de la taille de failles potentielles. Afin d'être capable de produire un déclenchement, de telles failles doivent déjà être fortement soumises aux contraintes extérieures. Cet élément commun à tous les événements déclenchés est fréquemment indiqué par des traces de failles actives.

Jusqu'à présent, la magnitude la plus élevée correspondant à une RTS est de 6,3. Il a été souligné (Allen, (1979) [1]) qu'une telle magnitude pourrait être considérée comme limite supérieure pour des événements relatifs à la RTS. Cette affirmation a été suivie par des commentaires suggérant qu'il n'y ait aucune raison de ne pas considérer la possibilité physique d'avoir des magnitudes supérieures à cette valeur maximale mesurée. Mais, sur la base des données relatives à un grand nombre de barrages existants, seuls quelques-uns ont montré des magnitudes de RTS légèrement supérieures à $M = 6$, alors que des milliers d'autres n'ont pas déclenché de tremblement de terre de si forte magnitude. Ainsi il serait très conservateur de considérer que tout barrage pourrait provoquer un MCE par une RTS. La limite supérieure $M = 6,3$ est donc une limite raisonnable sur la base de l'expérience acquise.

10. ASSESSING THE POTENTIAL AND MONITORING THE RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY

Practically any large dam, and especially of greater height, is a potential candidate for RTS. In order to assess its potential, it is necessary to evaluate the following sets of data:

- tectonic conditions and data on structural geology, supported by study of aerial photographs and satellite imagery;
- macroseismic data pertinent for the reservoir under study;
- detailed information on active faults in a wider region and especially all available data on recent fault activity in the dam and reservoir region;
- assessment of the seismic capability of all known faults in the dam and reservoir region;
- the regimes of underground water.

In conclusion, a full neotectonic study in the region of interest is needed for the assessment of the RTS potential of a dam project. In this respect ICOLD Bulletin 112 “Neotectonics and Dams” (1998), [18] contains valuable guidelines.

A very useful feature is the systematic study of territories using satellite imagery and GPS monitoring, so that the basic tectonic and neotectonic set-up and general information on crustal mobility and fault activity become available. Such information would be valuable for preliminary and detailed studies.

On the basis of such data it is possible to quantify the RTS risk. Reliable estimation of magnitudes of such events depends basically on the size of potential faults. In order to be prone to triggering such faults must already be highly stressed. This common feature of all triggered events is frequently indicated by traces of active faulting.

The highest magnitude produced by RTS events, to date, is 6.3. It has been argued (Allen, 1979) [1] that such a magnitude could be taken as an upper bound for RTS events. This statement was followed by comment that there is no compelling reason to consider that still larger magnitudes are not physically possible. But, it is an established fact that from a large population of existing dams, only a few have displayed RTS magnitudes slightly above M 6, while thousands of dams have not triggered such kinds of earthquakes. So it would be overly conservative to consider that every dam could provoke an MCE by RTS and the upper bound of M 6.3 is a reasonable limit on the basis of existing experience.

Des barrages modernes bien conçus, capables de résister au tremblement de terre maximal de projet relatif à l'environnement tectonique donné, sont protégés *ipso facto* contre la RTS. Dans ce sens, on peut affirmer que le tremblement de terre le plus fort auquel un barrage devrait résister n'est pas régi par la RTS, mais cette dernière a une influence sur l'occurrence des événements sismiques plus modérés et peut affecter le risque sismique global (dépendant du temps) d'un projet de barrage.

Dans des conditions correspondant à une faible sismicité historique, les études entreprises pour clarifier le potentiel de la RTS d'un site pourraient aider à déterminer le tremblement de terre de contrôle d'un tel site.

Mais l'occurrence des tremblements de terre relativement peu profonds avec des magnitudes proches de la limite supérieure proposée pour des événements déclenchés, pourrait encore être dévastatrice pour les bâtiments proches de la rétention et pour les ouvrages annexes du barrage. De telles possibilités doivent être considérées dans la conception du barrage et les mesures de protection adéquates doivent être entreprises. Une surveillance des phénomènes de RTS (avant, pendant et après la mise en eau) est d'une grande importance, puisqu'elle peut fournir la seule évidence permettant de confirmer si la rétention d'eau a causé des tremblements de terre déclenchés.

Sur la base d'investigations appropriées (comme citées précédemment), il est possible d'estimer la probabilité d'occurrence des événements de RTS. Même en considérant simplement un certain nombre de caractéristiques tectoniques générales d'une région, des indications utiles peuvent être obtenues. Les indicateurs de la RTS sont ainsi les suivants: failles normales avec des contraintes normales faibles le long des discontinuités, ruptures profondes du sous-sol avec une perméabilité accrue et non uniforme, ainsi que sismicité modérée et gradient modéré des mouvements tectoniques dans la région. Comme exemple illustratif, la plupart de ces facteurs étaient présents dans la région du réservoir de Mratinje (cité précédemment).

La surveillance instrumentale de la RTS est réalisée par le choix de stations sismologiques qui peuvent enregistrer et localiser des secousses relativement petites, avec des magnitudes entre 1 et 5.

La surveillance de la RTS devrait commencer des années avant la mise en eau, afin d'établir la nature de la sismicité de fond. Ceci est primordial, vu que l'absence de changements de la sismicité de fond pendant la rétention signifie l'absence de la RTS. Une station sismique simple représente l'équipement minimum à installer pendant la période de mise en eau, pour un réservoir où aucune RTS n'est prévue.

La disposition d'un choix optimal de stations sismologiques exige une étude détaillée pour chaque cas. Comme recommandation générale, le choix de cinq stations sismologiques est un minimum pratique pour réussir à déterminer les emplacements d'épicentres et les profondeurs hypocentrales.

L'information obtenue à partir de la surveillance de la RTS comporte l'historique des secousses sismiques enregistrées, pour lesquels l'emplacement épical, les profondeurs hypocentrales et les magnitudes sont déterminées. Si un groupe d'événements enregistrés suit les traces de la faille, il serait une indication valable d'une faille active générant des événements dus à la RTS.

Well designed modern dams able to successfully withstand the maximum earthquake controlling the dam safety in the given tectonic environment, are “*ipso facto*” protected against RTS. In that sense, it can be stated that the strongest ground shaking that a dam must be able to resist is not governed by RTS, but triggering has an influence on the timing of occurrence of more moderate seismic events and may affect the overall (time-dependent) seismic risk of a dam project.

Under conditions of low historic seismicity, studies undertaken to clarify the RTS potential of a site might help to determine the controlling earthquake at such sites.

But the occurrence of relatively shallow earthquakes with magnitudes in the vicinity of the proposed upper bound for triggered events might still be devastating for the buildings around the storage and for appurtenant structures. Such possibilities must be considered in dam design and corresponding protective measures undertaken, if found to be required. Adequate monitoring of RTS phenomena (prior, during and after impoundment) is of great importance, since such monitoring provides the only conclusive evidence as to whether or not storage impoundment caused triggered earthquakes.

On the basis of careful investigations (mentioned earlier) it is possible to estimate the likelihood of provoking RTS events. Even by simply considering a number of prominent general tectonic features of a region, useful indications can be obtained. The following are indicators for RTS: normal faulting with decreased normal stresses along discontinuities, deep fracturing with expressed and non-uniform permeability, moderate seismicity, and moderate gradients of tectonic movements in the region,. As a practical example, most of these factors were present at the Mratinje reservoir region (discussed earlier).

Instrumental monitoring of RTS is realized by arrays of seismic stations, which are able to record and locate relatively small shocks, with magnitudes between 1 and 5.

Monitoring of RTS should start at least a couple of years prior to impounding of the reservoir in order to ascertain the nature of background seismicity. This is important as lack of changes in background seismicity during impounding, means absence of RTS. A single seismic station is the absolute minimum to install during the pre-impounding period, for a reservoir where no RTS is expected.

The layout of an optimum array of seismic stations requires a detailed study for each case. As a general guideline five seismic stations are a practical minimum for successful determination of epicenter locations and hypocentral depths.

The information obtained from RTS monitoring comprises time histories of recorded seismic shocks, for which epicentral location, hypocentral depths and magnitudes are determined. If clustering of recorded events follows the fault traces, it is a valid indication of an active fault emitting RTS events.

11. CONSIDÉRATIONS FINALES

Aujourd'hui, la RTS est largement acceptée comme une réponse spécifique de l'environnement tectonique à la mise en eau par les réservoirs artificiels. La nature et les détails de ces phénomènes (comme cela est généralement le cas pour les caractéristiques hypocentrales des événements sismiques) ne sont la plupart du temps connus que qualitativement et sur la base d'informations indirectes. Par conséquent, des investigations complémentaires paraissent nécessaires. A l'heure actuelle, les essais directs aux profondeurs sismogéniques sont liés à des difficultés majeures et des coûts de réalisation élevés empêchant leur réalisation.

Cependant, sur la base des observations et des interprétations pertinentes, il est toujours admis que la mise en eau de retenues artificielles peut déclencher une activité sismique seulement lorsque des conditions tectoniques préexistantes y sont favorables. Le déclenchement de tels phénomènes sismiques est lié aux effets du poids du réservoir et à la diffusion accrue des pressions interstitielles dues à la retenue. Des variations rapides du niveau du réservoir sont aussi connues pour augmenter l'occurrence des événements de déclenchement. Un tel déclenchement est possible seulement si la faille est soumise à des contraintes proches des conditions critiques. Cette conclusion est basée sur les interprétations qualitatives des phénomènes observés, sur des essais en laboratoire simulant des états de couches profondes et sur des modélisations numériques, sachant qu'une validation par essai direct n'est pas réalisable à l'état actuel.

Un consensus général souligne que les phénomènes de déclenchement sont seulement possibles si les processus tectoniques continus ont déjà causé des conditions proches de l'état limite de rupture. Le plus grand effet à cet égard peut se manifester quand des fortes contraintes de cisaillement et des contraintes normales réduites existent déjà le long des failles déterminantes. C'est normalement le cas des failles normales et décrochements. Les failles inverses, montrant des contraintes normales considérables, sont moins sensibles au déclenchement. Cette conclusion qualitative est soutenue par des observations *in situ*.

La probabilité d'occurrence de la RTS augmente avec la taille des barrages et des réservoirs. Par conséquent, le potentiel de la RTS doit être considéré en premier lieu pour les grands barrages d'une hauteur supérieure à 100 m. Toutefois, aucune limite à cet égard n'est clairement définie.

Les phénomènes déclenchés sont des événements sismiques potentiels, qui, afin de se manifester, nécessitent une augmentation de la charge due au poids supplémentaire de la retenue et une accumulation de la pression interstitielle. Sur la base de cette observation, la magnitude maximale du séisme et l'intensité maximale au sol des événements sismiques ne peuvent pas être augmentées par les effets de la mise en eau, comparativement à des événements purement tectoniques. Ainsi, en ce qui concerne la sécurité du corps du barrage, si la détermination du tremblement de terre de projet est basée sur des données suffisantes et des analyses adéquates, le risque induit par des phénomènes de RTS est automatiquement couvert. Cependant, la sécurité des ouvrages annexes ainsi que des bâtiments et des structures proches du barrage devrait être vérifiée. Dans les cas d'une faible

11. CLOSING CONSIDERATIONS

Today, RTS is widely accepted as a specific response of the tectonic environment to impounding of large reservoirs. The nature and details of these phenomena (as is generally the case with hypocentral details of seismic events) are known mostly qualitatively and on the basis of indirect information. Therefore, further studies are needed in this respect. However, direct testing at seismogenic depths is coupled with both difficulties and cost which, at least at the present time, preclude this possibility.

Still, on the basis of accumulated observations and their interpretation, it is generally considered that impounding of reservoir can trigger a seismic activity only in conjunction with favorable pre-existing tectonic conditions. The triggering of such seismic phenomena is linked to the effects of applying the weight of reservoir and to the diffusion of increased pore pressures due to impounding. Rapid reservoir level variations are known to increase the occurrence of event triggering. Such triggering is possible only if the causative fault in question is already stressed to nearly critical conditions. This conclusion is reached on the basis of qualitative interpretation of observed phenomena, laboratory testing simulating deep strata conditions and numerical modeling. Confirmation by direct testing is not achievable at present.

There is a general consensus that triggering phenomena are possible only if ongoing tectonic processes have already caused conditions near to failure. The greatest effects in this regard can be expected when high shearing stresses and reduced normal stresses already exist along the governing faults. This is usually the case with normal and strike-slip faults. Reverse faults, exhibiting considerable normal stresses are less sensitive to triggering. This qualitative conclusion is supported by observations.

The probability of RTS occurrence increases with the increasing height of dams and the increasing size of the reservoirs. Therefore, RTS potential needs to be considered in the first place for large dams with a height of over 100 m. But there are no clearly defined limits in this respect.

Triggered phenomena are seismic events, which were not quite ripe to happen and needed incremental effects of reservoir load and pore pressure build up, to be manifested. From such a concept follows the important practical conclusion that the maximum magnitude and maximum surface intensity of seismic events cannot be increased through effects of reservoir impounding, in relation to purely tectonically caused events. Thus, if the determination of the controlling design earthquake is based on sufficient data and pertinent analyses, the risk caused by RTS phenomena is automatically covered, as far as the safety of the dam is concerned. However, the earthquake safety of appurtenant structures and buildings and structures in the dam vicinity should be checked. In cases of low historical seismicity, the neotectonic studies undertaken to assess the RTS potential might lead to determination of the

sismicité historique, les études néotectoniques entreprises pour évaluer le potentiel de la RTS pourraient mener à la détermination du tremblement de terre de projet. À cet égard, l'existence de failles quaternaires est particulièrement importante.

La surveillance de l'activité de la RTS dans la région du barrage et sa retenue est surtout recommandée pour les grands barrages avec une grande capacité de stockage. La surveillance avant la mise en eau est exigée pour distinguer la sismicité de fond de la RTS. L'installation d'une seule station de mesure est suffisante pour surveiller le niveau d'activité de fond. La comparaison de l'activité sismique avant et après la mise en eau est la meilleure méthode pour identifier des phénomènes déclenchés et devrait être appliquée constamment, ceci ne représentant pas un investissement économique important. Pour localiser les endroits épicaux et les profondeurs hypocentrales fiables, l'installation de plusieurs stations locales est fortement recommandée.

controlling earthquake. The existence of Quaternary faulting is particularly important in this respect.

Monitoring the RTS activity in the dam and reservoir region is recommended for large dams and reservoirs. Monitoring before impoundment is required in order to distinguish between background seismicity and RTS. Placement of one station is sufficient to monitor the background activity level. Comparing the pre- and post-impounding seismic activity is the best method for identifying triggered phenomena and should be applied as a general rule, considering also that it does not represent important economic burden. For obtaining reliable epicentral locations and hypocentral depths, a local array of stations is required.

12. RÉFÉRENCES/REFERENCES

- [1] ALLEN, C. R., 1979. "Reservoir-induced Earthquakes and Engineering Policy", *Proceedings of Research Conference on Intro-Continental Earthquakes*, Ohrid, Yugoslavia.
- [2] ALLEN, C. R. and CLUFF, L. S., 2000. "Active Faults in Dam Foundations: An Update", *Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, paper no. 2490, Auckland, New Zealand.
- [3] BAECHER, G. N. and KEENEY, R. L., 1982. "Statistical Examination of Reservoir-Induced Seismicity", *Seismological Society of America Bulletin*. Vol. 72.
- [4] BELL, M. L. and NUR, A., 1978. "Stress Changes Due to Reservoir-Induced Pore Pressure and Stresses, and Application to Lake Oroville", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83.
- [5] BOZOVIC, A., 1974. "Review and appraisal of Case Histories Related to Seismic Effects of Reservoir Impounding", *Engineering Geology*, Vol. 8, No. 1/2.
- [6] BOZOVIC, A., TUCOVIC I., DUNGAR, R., 1979. "Seismic analysis of Poechos dam spillway headworks", *13th Congress of ICOLD*, Q.51, R.21.
- [7] BRACE, W. F., 1974. "Experimental Studies of Seismic Behaviour of Rocks under Crustal Conditions", *Engineering Geology*, Vol. 8, No. 1/2.
- [8] BRACE, W. F. and BYERLEE, J. D., 1970. "California Earthquake: Why Only Shallow Focus?", *Science*, 168.
- [9] BYERLEE, J. D., 1966. "The Frictional Characteristics of Westerly Granite", *Thesis M.I.T.*, Cambridge, USA.
- [10] BYERLEE, J. D., 1968. "Brittle-Ductile Transition in Rock". *Journal of Geophysical Research*, 73.
- [11] *Energoprojekt, Consultants, 2004.* Partial tectonic map of Mratinje storage.
- [12] GUPTA, H. K., RASTOGI B. K., 1976. "Dams and Earthquakes". *Elsevier*, Amsterdam.
- [13] GUPTA, H. K., 1992. "Reservoir-Induced Earthquakes". *Elsevier*, Amsterdam.
- [14] HAGIWARA, T. and OHTAKE, M., 1972. "Seismic activity Associated with the Filling of the Reservoir behind the Kurobe Dam, Japan", 1963-1970, *Tectonophysics*, 15, 241-254.
- [15] HANDIN, J. *et al.*, 1963. "Experimental Deformation of Sedimentary Rocks under Confining Pressure: Pore Pressure Tests". *Bulletin of American Society for Petrology and Geology*, Vol. 47.
- [16] HOWELLS, D. A., 1976. "The Time for a Significant Change of Pore Pressure", *Engineering Geology*, Vol. 8, No. 1/2.

- [17] HSU TSUNG-HO., 1975. "Strong Motion Observation of Water-Induced Earthquakes at Hsingfengkiang Reservoir in China", *Academia Sinica*, Beijing, China.
- [18] HUACO, D., 1978. "Seismicity of the Storage Zone Chira-Piura", *Geophysical Institute of Peru*, Lima.
- [19] ICOLD, 2004. World Register of Dams.
- [20] ICOLD Bulletin 112, 1998. Neotectonics and Dams.
- [21] "International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", 2002 Editors: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C., Vol. A and B, Academic Press.
- [22] JUDD, W. R., (editor), 1974. "Seismic Effects of Reservoir Impounding", *Engineering Geology*, Vol. 8, No. 1/2.
- [23] *Kansai Electric Power Company*, "Static and Dynamic Behavior of Kurobe Dam", 1960-1995.
- [24] KEBEASY, R. M., MAMAMOUN, M., IBRAHIM, E., SIMPSON, D. W., and LEITH, W. S., 1987. "Earthquake Studies at Aswan Reservoir", *Jour. of Geodynamics*, 7, 173-193.
- [25] KISSLINGER, C., 1976. "A Review of Theories of Mechanisms of Induced Seismicity", *Engineering Geology*, Vol. 10, No. 2/4.
- [26] LOGANI, K. L., 1979. "Reservoir Induced Seismicity", *13th Congress of ICOLD*, 5, pp. 625-630.
- [27] MADARIAGA, R. and OLSEN, K. "Earthquake Dynamics", Vol. A, Chapt. 2, Paper 12, pp.175-194, in [21].
- [28] MILNE, W. G. (editor), 1976. "Induced Seismicity", *Engineering Geology*, Vol. 10.
- [29] NIKOLAYEVSKIY, V. N., 1982. "Earth Crust, Dilatancy and Earthquakes", section of book on "Focal Mechanics of Earthquakes", *Mir Publishers*, Moscow.
- [30] OHNAKA, M., 2004. "Earthquake Cycles and Physical Modeling of the Process Leading up to a Large Earthquake" (Review Paper), *Proceedings of the Hagiwara Symposium, A Special Issue of Earth, Planets and Space*, 56 (8), 773-793.
- [31] OKAMOTO, S., MIZUKOSHI, T. and MIYATA, Y., 1986. "On the Observation of Microearthquake Activity before and after Impounding of the Takase Dam", *A Special Report, Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44, 115-133.
- [32] OKAMOTO S., MIZUKOSHI, T. and MORI, Y., 1991. "Analyses of Microearthquake Activity before and after Impounding of Takase Reservoir", *17th Congress of ICOLD*, Report C 10, 751-777.
- [33] PERMAN, R. C., PACKER, D., COPPERSMITH and KNEUPFER, P. L., 1983. "Collection of Data Bank on Reservoir-Induced Seismicity", *USGS Contract No. 14-08-0001-19132*.

- [34] RALEIGH, C. B., HEALY, J. H. and BREDEHOEFT, H. D., 1976. "An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado". *Science*, 191, 1230-1237.
- [35] "Reports on Monitoring of Seismic Activity at Mratinje Storage covering 1974-1981 period", *Seismological Institute of Montenegro*.
- [36] "Seismic Monitoring of Mratinje Dam", *Seismological Institute Skopje*, 1973.
- [37] "Seismic Monitoring of Poechos Dam". *Seismological Institute of Peru*, Lima, Peru, 1979.
- [38] SHEN, C. K., CHEN, H. C., CHANG, C. H., HUANG, L. S., LI, T. C., YANG, C. Y., WANG, T. C., and LO H. H., 1973. "Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and their Effects on Hsingfengkiang Dam", *Scientia Sinica*, 17, No 2, Beijing, China.
- [39] SIMPSON, D. W., 1976. "Seismicity Changes Associated with Reservoir Loading", *Engineering Geology*, Vol. 10, No. 2/4.
- [40] SIMPSON, D. W., 1986. "Triggered Earthquakes", *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 14, 21-42.
- [41] SIMPSON, D. W., 1988. "Two Types of Reservoir Induced Seismicity", *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [42] STESKY, R. M. *et al.*, 1974. "Friction in Faulted Rock at High Temperature and Pressure", *Tectonophysics*.
- [43] TOPPOZADA, T. R. and MORISSON, P. W., 1982. "Earthquakes and lake levels at Oroville, California", *California Geology*, 35, 115-118.
- [44] TURCOTTE, D. L. and MALAMUD, D., "Earthquake as a complex system", Vol. A, Chapter II, Paper 14, pp. 208-227, in 21.
- [45] TURUOKA, H., 1998. Introduction of Earthquake Catalog Database, Japan, *Earthquake research Institute Publication No. 22*.
- [46] USCOLD 1997. "Reservoir Triggered Seismicity".
- [47] WANG, M.-Y. *et al.*, 1975. "Mechanism of the Reservoir Impounding Earthquakes at Hsingfengkiang and a Preliminary Endeavour to Discuss their Cause", *Academia Sinica*, Beijing, China.
- [48] WELLS, D. L. and COPPERSMITH, K. J., 1994. "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement", *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4.
- [49] WESTERGAARD, H. M. and ATKINS, A. W., 1934. "Deformation of the Earth Surface due to Weight of the Boulder Reservoir", *Bureau of Reclamation*, T.M. No. 422.
- [50] YEATS, R. S., SIEH, K. and ALLEN C. R., 1997. "The geology of earthquakes", *New York, Oxford Univ. Press*, 568 pp.

Imprimerie de Montligeon
61400 St Hilaire le Châtel
Dépôt légal : Novembre 2011
N° 25805
ISSN 0534-8293



INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
61, avenue Kléber, 75116 Paris
Téléphone : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 18 22
<http://www.icold-cigb.org/>