

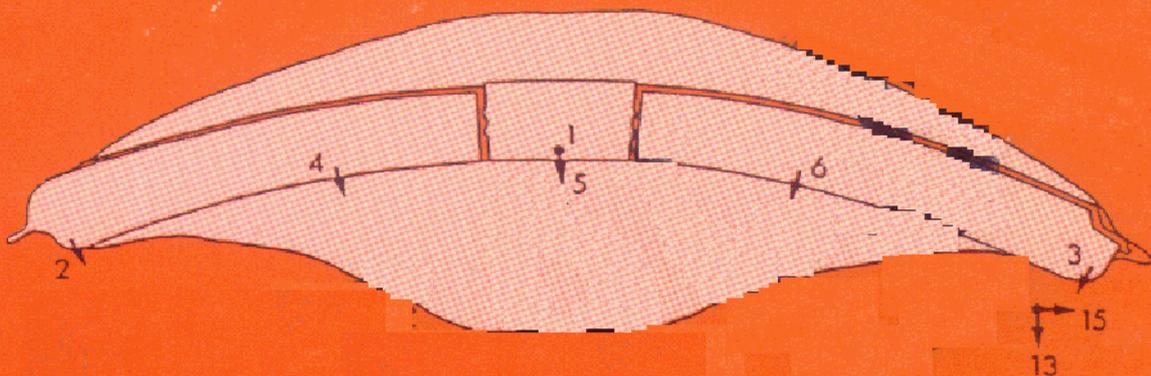
# SEISMIC OBSERVATION OF DAMS

*Guidelines and case studies*

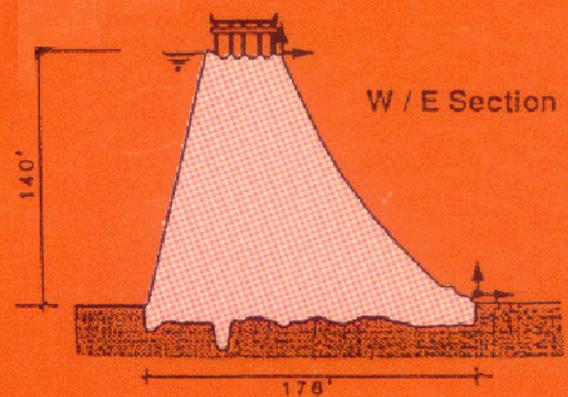
# OBSERVATIONS SISMIQUES DES BARRAGES

*Recommandations et exemples*

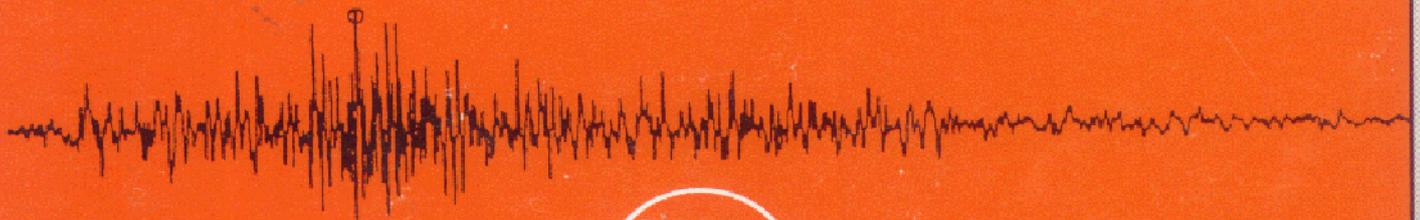
**Bulletin 113**



Plan



W / E Section



**1999**

The cover illustration is reproduced from Fig. 5 of the Bulletin : Lower Crystal Springs Dam - Seismic instrumentation

*L'illustration de couverture reproduit la Fig. 5 du Bulletin : Barrage Lower Crystal Springs - Appareils de mesures sismiques*

Original text in English  
French translation by Y. Le May

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

COMMISSION INTERNATIONALE  
DES  
GRANDS BARRAGES  
151, boulevard Haussmann  
75008 PARIS

**SEISMIC OBSERVATION  
OF DAMS**

---

*Guidelines and case studies*

**OBSERVATIONS SISMIQUES  
DES BARRAGES**

---

*Recommandations et exemples*

---

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris  
Tél. : (33-1) 53 75 16 52 - Fax : (33-1) 40 42 60 71  
E-mail : [secretaire.general@icold-cigb.org](mailto:secretaire.general@icold-cigb.org) - Site : [www.icold-cigb.org](http://www.icold-cigb.org).

---

**AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:**

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

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

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

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

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

**NOTICE – DISCLAIMER :**

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON SEISMIC ASPECTS OF DAM DESIGN  
COMITÉ DES ASPECTS SISMQUES DES PROJETS DE BARRAGES  
(1997-1999)

*Chairman/Président*

Yugoslavia/Yougoslavie A. BOZOVIC

*Members/Membres*

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

---

(1) Member until 1998/Membre jusqu'en 1998.

(2) Member since 1998/Membre depuis 1998.

---

---

## SOMMAIRE

---

---

## CONTENTS

---

AVANT-PROPOS	FOREWORD
1. INTRODUCTION	1. INTRODUCTION
2. REMARQUES GÉNÉRALES SUR LA SURVEILLANCE SISMIQUE DES BARRAGES	2. GENERAL REMARKS ON SEISMIC SURVEILLANCE OF DAMS
3. DÉFINITION DU RÉSEAU DE CAPTEURS	3. DEFINITION OF TRANSDUCER NETWORK
4. CONCEPTION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION ET CHOIX DES APPAREILS	4. DESIGN OF THE MONITORING SYSTEM AND CHOICE OF THE HARDWARE
5. INSTALLATION, EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES DISPOSITIFS DE MESURE	5. INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE CONSIDERATIONS
6. CRITÈRES DE TRAITEMENT DES DONNÉES	6. DATA PROCESSING CRITERIA
7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS
ANNEXES	APPENDICES

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

AVANT-PROPOS.....	10
1. INTRODUCTION .....	12
2. REMARQUES GÉNÉRALES SUR LA SURVEILLANCE SISMIQUE DES BARRAGES .....	16
2.1. Objectifs de la surveillance.....	16
2.1.1. Contrôle de la sécurité.....	16
2.1.2. Amélioration de la conception, de la construction et de l'exploitation parasismiques des barrages.....	18
2.2. Évaluation de l'opportunité des observations .....	20
3. DÉFINITION DU RÉSEAU DE CAPTEURS.....	26
3.1. Aspects généraux du problème .....	26
3.2. Mesure du mouvement de sollicitation sismique.....	26
3.3. Mesure de la réponse de l'ouvrage.....	30
3.4. Auscultation des ouvrages annexes.....	34
3.5. Auscultation de la retenue .....	34
4. CONCEPTION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION ET CHOIX DES APPAREILS.....	40
4.1. Conditions fondamentales requises .....	40
4.2. Capteurs.....	42
4.2.1. Accélérographes.....	42
4.2.2. Autres capteurs .....	54
4.3. Structure du dispositif.....	54
5. INSTALLATION, EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES DISPOSITIFS DE MESURE .....	60
5.1. Installation.....	60
5.1.1. Fixation à la fondation et à l'ouvrage .....	60
5.1.2. Orientation.....	62
5.1.3. Enceinte de protection .....	62
5.1.4. Drainage et humidité .....	62
5.1.5. Température .....	64
5.1.6. Alimentation en énergie.....	64
5.1.7. Problèmes d'interconnexion .....	64

---

---

## TABLE OF CONTENTS

---

FOREWORD .....	11
1. INTRODUCTION .....	13
2. GENERAL REMARKS ON SEISMIC SURVEILLANCE OF DAMS .....	17
2.1. Aims of the surveillance .....	17
2.1.1. Safety control.....	17
2.1.2. Improvement of aseismic design, construction and operation of dams .....	19
2.2. Evaluation of opportunity for observation .....	21
3. DEFINITION OF TRANSDUCER NETWORK .....	27
3.1. General aspects of the problem .....	27
3.2. Monitoring of the earthquake input motion .....	27
3.3. Monitoring of the structural response .....	31
3.4. Monitoring of the appurtenant structures .....	35
3.5. Monitoring of the reservoir .....	35
4. DESIGN OF THE MONITORING SYSTEM AND CHOICE OF THE HARDWARE .....	41
4.1. Basic requirements .....	41
4.2. Transducers .....	43
4.2.1. Accelerographs.....	43
4.2.2. Other transducers.....	55
4.3. System architecture .....	55
5. INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE CONSIDERATIONS .....	61
5.1. Installation .....	61
5.1.1. Foundation and structure attachment .....	61
5.1.2. Orientation.....	63
5.1.3. Enclosure .....	63
5.1.4. Drainage and humidity .....	63
5.1.5. Temperature .....	65
5.1.6. Power.....	65
5.1.7. Interconnection problems .....	65

5.2. Exploitation et entretien des accélérographes.....	64
5.2.1. Exploitation des appareils analogiques.....	64
5.2.2. Entretien des appareils analogiques.....	66
5.2.3. Exploitation des appareils digitaux.....	68
5.2.4. Entretien des appareils digitaux.....	70
6. CRITÈRES DE TRAITEMENT DES DONNÉES.....	72
6.1. Introduction.....	72
6.2. Traitement et utilisation des enregistrements de fortes secousses.....	72
6.3. Traitement des enregistrements de réponse de barrage.....	74
7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	78
ANNEXE 1 - ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES BARRAGES AU MOYEN D'ESSAIS DE VIBRATION FORCÉE.....	
1. Rôle de l'expérimentation.....	84
2. Exécution des essais.....	86
2.1. Excitation.....	86
2.2. Mesure de la réponse et analyse des données.....	88
3. Exemple : Barrage Talvacchia.....	90
4. Conclusions.....	92
ANNEXE 2 - EXEMPLES.....	
1. Barrage Kurobe.....	100
1.1. Introduction.....	100
1.2. Appareils de mesure.....	100
1.3. Résultats des mesures.....	102
1.3.1. Microséismes.....	102
1.3.2. Observations sismiques.....	102
2. Haut Barrage d'Assouan.....	104
3. Résultats de mesures sur des barrages soumis à des séismes aux États-Unis.....	108
3.1. Barrage Lower Crystal Springs.....	108
3.2. Barrage Lower van Norman.....	110
3.3. Barrage Pacoima.....	112
3.4. Barrage Long Valley.....	114
3.5. Barrage San Justo.....	116

5.2. Operation and maintenance of accelerographs .....	65
5.2.1. Operation of the analog instrument .....	65
5.2.2. Maintenance of the analog instrument .....	67
5.2.3. Operation of the digital instrument .....	69
5.2.4. Maintenance of the digital instrument .....	71
6. DATA PROCESSING CRITERIA .....	73
6.1. Foreword .....	73
6.2. Processing and utilisation of strong motion records .....	73
6.3. Processing of dam response records .....	75
7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS .....	79
APPENDIX 1 - ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF DAMS BY MEANS OF FORCED VIBRATION TESTS.....	85
1. The role of experimentation .....	85
2. The execution of the tests .....	87
2.1. Excitation .....	87
2.2. Response measurement and data analysis .....	89
3. Example : Talvacchia dam .....	91
4. Conclusions .....	93
APPENDIX 2 - CASE STUDIES .....	101
1. Kurobe dam .....	101
1.1. Introduction .....	101
1.2. Instrumentation .....	101
1.3. Results of measurements .....	103
1.3.1. Microearthquakes .....	103
1.3.2. Earthquake observations .....	103
2. High Aswan Dam .....	105
3. Some data on instrumented dams under earthquake action in USA .....	109
3.1. Lower Crystal Springs Dam .....	109
3.2. Lower van Norman Dam.....	111
3.3. Pacoima Dam.....	113
3.4. Long Valley Dam .....	115
3.5. San Justo Dam .....	117

---

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

---

Tableau 1 - Types et caractéristiques des accélérographes

Tableau 2 - Solutions d'interconnexion des appareils

Fig. 1 - Réseau de capteurs du barrage Talvacchia

Fig. 2 - Premiers modes de vibration du barrage, déterminés à partir de l'essai de vibration forcée

Fig. 3 - Fonctions de transfert déduites des essais de vibration forcée

Fig. 4 - Fréquences de premier mode en fonction du niveau de retenue

Fig. 5 - Barrage Lower Crystal Springs - Appareils de mesures sismiques

Fig. 6 - Barrage Pacoima - Emplacement des capteurs

Fig. 7 - Barrage Long Valley - Emplacement des capteurs

---

## LIST OF TABLES AND FIGURES

---

Table 1 - Types and features of accelerographs

Table 2 - Instrument interconnection options

Fig. 1 - The transducer network of the Talvacchia Dam

Fig. 2 - First vibration modes of the dam, determined from forced vibration test

Fig. 3 - Transfer functions from forced vibration tests

Fig. 4 - First mode's frequencies versus water level

Fig. 5 - Lower Crystal Springs Dam - Seismic instrumentation

Fig. 6 - Pacoima Dam - Sensors location

Fig. 7 - Long Valley Dam - Sensors location

---

## AVANT-PROPOS

---

La surveillance du comportement des barrages en service, sous diverses actions, est une technique aussi ancienne que celle de la construction des barrages. Elle a un double objectif :

- vérifier la sécurité des barrages,
- améliorer et accroître les connaissances dans le domaine du comportement des barrages, source principale de progrès dans la conception de ces ouvrages et dans l'optimisation de leurs formes.

Ces considérations fondamentales s'appliquent également aux observations sismiques des barrages et aux appareils d'auscultation correspondants. Leur rôle essentiel doit être souligné, compte tenu des possibilités restreintes d'observation et de la nature complexe de la réponse d'un barrage à des secousses sismiques transitoires.

Le présent Bulletin traite des aspects fondamentaux de l'auscultation sismique des barrages et donne des recommandations et critères concernant la conception, l'installation, l'exploitation et l'entretien des dispositifs d'auscultation, y compris le traitement et l'utilisation des résultats des mesures. L'analyse développée dans le Bulletin est corroborée par la présentation d'essais de vibration forcée exécutés sur des barrages et par des exemples représentatifs, figurant dans deux Annexes.

Le Bulletin a été préparé par Dr. Aldo Castoldi et a fait l'objet d'un examen au sein du Comité des Aspects Sismiques des Projets de Barrages, après diffusion aux Comités Nationaux qui ont transmis d'intéressants commentaires.

Le Bulletin s'adresse à l'ensemble des ingénieurs de barrages concernés par l'auscultation sismique de ces ouvrages.

A. BOZOVIC

Président du Comité des Aspects Sismiques  
des Projets de Barrages

---

## FOREWORD

---

Observing the behaviour of dams in service, under various influences, is an art as old as building of dams. It has a twofold objective :

- verifying the safety of dam structure
- improving and increasing the knowledge concerning the structural behaviour of dams, the main source of development in dam designs and in optimising dam shapes.

These basic rules hold true also for seismic observation of dams and corresponding seismic instrumentation. Their critical role is even more stressed, considering the restricted possibilities for actual observation and the complex nature of dam response to transient shaking during earthquakes.

This Bulletin contains the basic aspects of seismic instrumentation and observation of dams and outlines guidelines and criteria for the design of monitoring systems, their installation, operation and maintenance, including the processing and utilisation of the obtained records. The subject matter of the Bulletin is supported by presentation of forced vibration tests performed on dams and by representative Case Studies, given in Annex.

This Bulletin was prepared by Dr. Aldo Castoldi and reviewed in ICOLD Technical Committee on Seismic Aspects of Dam Design, after being circulated among the National Committees which contributed a number of valuable comments.

The Bulletin is intended to serve as Guidelines on seismic observation matters within the dam engineering community.

A. BOZOVIC

Chairman, Committee on Seismic Aspects  
of Dam Design

---

# 1. INTRODUCTION

---

L'analyse du comportement de barrages ayant subi des séismes dans le passé montre clairement que ces ouvrages ont une forte capacité intrinsèque de résistance aux forces sismiques, à condition qu'ils soient bien conçus et construits.

Cependant, il est également manifeste que les forts tremblements de terre ont produit des dégâts notables, ce qui indique que le comportement sismique réel de ces ouvrages n'est pas pleinement connu, et donc des améliorations dans le domaine de leur conception sont encore possibles.

Ces considérations soulignent et justifient l'intérêt d'installer sur ces ouvrages des dispositifs de surveillance sismique.

En fait, ces dispositifs permettent, d'une part, de mesurer les effets induits par les séismes et ainsi de prendre à temps des décisions justifiées : en particulier, de valider des modèles statistiques et probabilistes, et de prédire le comportement sismique de la structure, avec mise à jour continue des zones sismiques et des cartes de risques. D'autre part, ils permettent d'améliorer nos connaissances actuelles sur les phénomènes complexes, encore insuffisamment compris, qui surviennent dans le système barrage - fondation - retenue. En outre, un ensemble de données précises sur la réponse réelle aux séismes sont recueillies, à partir desquelles il est possible d'établir et de valider des modèles numériques et des méthodes de conception plus sophistiqués. Tout cela conduit, en définitive, à une amélioration de la sécurité et à une réduction des coûts.

Afin d'être réellement efficace et d'atteindre les objectifs précités, la surveillance sismique doit naturellement comprendre l'exécution de diverses opérations :

- tout d'abord, des **diagnostics** destinés à connaître, de façon approfondie, les conditions réelles de l'ouvrage. À cet effet, il est nécessaire de mettre en œuvre un programme approprié d'inspections et d'essais in situ, d'essais en laboratoire et d'essais de vibration forcée in situ.
- une **auscultation statique** pour mesurer des quantités telles que déformations, déformations unitaires, fuites, sous-pressions, etc., définissant l'état « initial » de l'ouvrage et constituant des paramètres de son comportement normal.
- enfin, une **modélisation mathématique** pour une analyse approfondie et exacte des données rassemblées et des marges de sécurité existantes.

Il faut donc souligner que la surveillance sismique est une partie très importante d'un large processus destiné à fournir au maître d'ouvrage des moyens appropriés pour une gestion sûre de l'aménagement.

Il importe donc que cette surveillance sismique soit conçue et programmée, en tenant compte, dès le début, de l'ensemble du processus et de la corrélation existant avec d'autres opérations.

---

# 1. INTRODUCTION

---

The analysis of the behaviour of dams hit by earthquakes in the past, clearly shows that these structures have a high intrinsic capability to resist the seismic forces, provided they are well designed and built.

However, there is evidence too that exceptionally strong earthquakes have produced remarkable damages, thus showing that the actual seismic behaviour of these structures is not yet fully understood, and – consequently – some improvement as to their design is still possible.

These considerations support and justify the concept that it is advisable to install on these structures seismic surveillance systems.

These systems, in fact, allow – on one hand – the effects induced by the earthquake to be measured and timely and justified decisions to be consequently taken : in particular, to validate statistical and probabilistic models and to predict structural seismic behaviour and continuous updating of seismic zoning and risk maps. On the other hand, they allow our present knowledge to be improved of the complex phenomena, still insufficiently understood, which occur during an earthquake within the dam - foundation - reservoir system. Moreover, a set of precise data on the actual response is gathered on the basis of which it is possible to set up and validate more sophisticated numerical models and design methods: all these lead, at the end, to an increased safety and to a reduction of costs.

In order to be really effective and to reach the above said targets, the seismic surveillance needs, of course, some additional activities to be done :

- first : **diagnostics**, by means of which a deep knowledge of the actual conditions of the structure has to be reached. To this end, the diagnostics activity requires a suitable programme of inspections and in situ tests, material laboratory tests and in situ forced vibration tests.

- **static surveillance** to measure quantities such as deformations, strains, leakage, uplift pressures etc., which define the “ initial ” state of the structure and are indexes of its regular behaviour.

- finally, **mathematical modelling** for a correct and deep analysis of the data gathered and of the existing margin of safety.

Therefore, it is worth underlining that seismic surveillance is a part, although a very important one , of a wider process aimed at providing the Owner with proper tools for a safe management of the plant.

Consequently it is of remarkable importance that it be conceived and scheduled taking into account, from the beginning, the whole process and the correlation existing among the other activities.

Le but de la présente publication est donc de fournir au maître d'ouvrage et à ses ingénieurs les critères à adopter pour une conception satisfaisante d'un dispositif de surveillance, tenant compte des objectifs examinés ci-dessus. En outre, le document donne des informations sur les appareils de mesure existants, les critères pour leur choix et leur installation, et examine l'exploitation du dispositif, une attention particulière étant portée à l'entretien ainsi qu'au traitement et à l'interprétation des résultats des observations.

Dans les annexes, des commentaires sont présentés sur les résultats d'essais de vibration forcée, et leur contribution à la connaissance du comportement réel du barrage est discutée; quelques exemples significatifs de dispositifs de surveillance sont donnés.

Target of this publication is therefore to provide the Owner of a dam and its engineers with the criteria to be adopted for a correct design of the surveillance system, which takes into account the wider aims discussed above. Moreover, this document informs on the existing instrumentation, on criteria for its choice and installation, and discusses the operation of the system, with special emphasis on maintenance as well as on data processing and interpretation.

In the annexes, comments are given on the performance of forced vibration tests, and their contribution to the knowledge of the actual dam behaviour is discussed and some significant cases of application of surveillance systems are illustrated.

---

## 2. REMARQUES GÉNÉRALES SUR LA SURVEILLANCE SISMIQUE DES BARRAGES

---

### 2.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE

Pour une bonne conception d'un dispositif de surveillance, il est nécessaire de bien définir ses objectifs, car ils conditionnent les caractéristiques du dispositif proprement dit, ainsi que les autres opérations s'y rapportant (en particulier, celles relatives à l'interprétation des données au moyen de modèles numériques). En outre, cela permet une analyse correcte du rapport coût - bénéfices, sur laquelle est basé le choix d'un dispositif de surveillance plus ou moins complexe.

Comme déjà signalé, il y a deux objectifs principaux :

- rassembler des données pour une exploitation sûre de l'aménagement;
- mieux connaître les actions sismiques affectant le barrage, sa fondation et la retenue.

#### 2.1.1. Contrôle de la sécurité

Le dispositif de contrôle doit fournir des données rationnelles utiles et permettre de prendre des décisions en temps réel (par exemple, une baisse rapide du plan d'eau, si c'est possible), nécessaires pour garantir la sécurité de l'aménagement ainsi que des populations et de leurs biens pouvant être affectés par une rupture éventuelle.

Il y a lieu de noter que la sécurité d'un barrage vis-à-vis des séismes concerne non seulement le corps du barrage ainsi que ses fondations, mais également les ouvrages annexes ; il faut y ajouter la sûreté de fonctionnement des vannes d'évacuation après le séisme, ainsi que la stabilité du terrain naturel et des versants de la retenue pendant et après le séisme.

À cet effet, il est maintenant possible, grâce à l'amélioration des performances des appareils de mesure et des moyens de calcul, d'adopter divers schémas de surveillance de plus en plus complexes, tenant compte de l'importance et des risques potentiels de l'ouvrage.

L'objectif de base de la surveillance est la mesure du phénomène sismique au moyen de l'enregistrement des accélérations au pied du barrage et le long de ses appuis ; dans ce cas, le critère pour l'évaluation de l'importance du phénomène sismique survenu est la comparaison avec le séisme de projet. Si l'intensité de celui-ci est inférieure à celle du séisme enregistré, on peut supposer que la structure a subi quelques dégâts ; il est donc nécessaire d'entreprendre des analyses pour évaluer l'état réel de l'ouvrage.

Cependant, compte tenu de la complexité des ouvrages et du fait que la réponse sismique du barrage dépend de phénomènes non encore parfaitement compris (dissipation de l'énergie, interaction barrage - fondation, etc.), une méthode

---

## 2. GENERAL REMARKS ON SEISMIC SURVEILLANCE OF DAMS

---

### 2.1. AIMS OF THE SURVEILLANCE

For a proper design of a surveillance system, a correct definition of its aims is needed, since on it depend the characteristics of the system itself, as well as the other relevant activities (in particular, those related to the data interpretation by means of numerical models). Moreover, it allows a correct cost-benefit analysis, based on which the choice of a more or less complex surveillance system has to be made.

As already pointed out, two are the main targets:

- to gather data for a safe operation of the plant
- to improve the knowledge of the seismic actions affecting the dam, its foundations and the reservoir.

#### 2.1.1. Safety control

The control system must supply all the useful rational data and real time decisions (such as, for example, a rapid drawdown of the water level, if possible) needed to guarantee the safety of the plant as well as of the people, or its properties, which might be affected by a possible collapse.

It may be noted that the safety of a dam against earthquakes concerns not only the safety of the dam body along with its foundation, but also the earthquake resistance of the appurtenant structures, reliable post-earthquake operation of spillway and sluice gates and further, the stability, during and after the earthquake, of the natural ground and slopes around the reservoir.

For this purpose, thanks to the improvement of the performances of both instrumentation and computing means, it is nowadays possible to adopt different schemes for the surveillance, more and more complex in relation to the importance and potential dangerousness of the structure.

At its lower level, the goal of the surveillance is the measurement of the seismic event, through the record of the accelerations at the dam base or along its abutments: in this case the criterion for assessing the importance of the occurred seismic event is the comparison with the design earthquake. Only in case the latter is lower than the recorded one, it can be inferred that the structure may have suffered some damage: consequently the analyses needed to evaluate the actual state of the structure have to be performed.

However, owing to the complexity of the plant, and to the fact that the seismic response of the dam depends on still not well understood phenomena (energy dissipation, dam-foundation interaction, etc.), a more sophisticated surveillance

de surveillance plus sophistiquée comprenant, parmi les quantités à mesurer, la réponse du barrage est jugée souhaitable.

Cette approche élude non seulement toutes les incertitudes possibles du projet, mais également celles relatives à la situation réelle de l'ouvrage quant à sa conservation et son bon fonctionnement.

Dans ce cas, il apparaît évident de réduire autant que possible l'étendue du réseau de capteurs ; en même temps, le choix des points d'auscultation doit permettre de déterminer les valeurs maximales de la réponse.

Pour un tel choix, il est utile de prendre en compte, s'ils sont disponibles, les résultats d'un modèle numérique validé du barrage et les résultats d'essais de vibration forcée *in situ*, à partir desquels les paramètres dynamiques sont obtenus.

À un niveau plus sophistiqué, la surveillance vise à obtenir, outre les valeurs de réponse, certains paramètres caractérisant le comportement dynamique de l'ouvrage (fréquences naturelles, formes modales, amortissement, pressions hydrodynamiques, etc.). Cela permet une validation directe des codes de calcul utilisés pour vérifier l'ouvrage après le séisme. En outre – du point de vue scientifique – il est ainsi possible de recueillir des informations sur le comportement réel de l'ensemble barrage - fondation - retenue soumis à de fortes contraintes.

En général, la surveillance sismique doit permettre d'évaluer le type et l'importance des dégâts survenus, d'estimer la capacité de l'ouvrage à continuer de remplir ses fonctions, et de définir le programme des reconnaissances supplémentaires et des mesures correctives à mettre en œuvre, si nécessaire.

À cet effet, toutes informations utiles provenant d'autres sources, en particulier des inspections et de l'exploitation des dispositifs de surveillance statique (déplacements, mouvements de joints et de fissures, percolations, fuites, sous-pressions) doivent être prises en compte.

### **2.1.2. Amélioration de la conception, de la construction et de l'exploitation parasismiques des barrages**

La surveillance sismique des barrages, bien qu'elle ne soit pas encore largement appliquée, a déjà fourni de très intéressantes données aux spécialistes dans ce domaine.

Ces données montrent que les méthodes actuelles d'étude présentent une précision acceptable pour la prévision de la réponse sismique ; toutefois, il existe toujours le besoin d'une meilleure compréhension de certains phénomènes importants et d'une plus grande quantité de données pour la mise au point de méthodes de conception plus sophistiquées.

À ce propos, il est bon de rappeler quelques-uns des importants problèmes encore non résolus :

- la **définition des données sismiques** : effets des mécanismes des sources, des chemins des ondes sismiques, de la géologie locale, de l'amplification du site, de la forme du canyon, etc., sur le séisme de projet (en particulier, dans la mesure où l'intensité, l'accélération de pointe du sol et la forme spectrale sont concernées) ;

approach is deemed advisable, which includes, among the quantities to be measured, the response of the dam.

This approach not only by-passes all possible uncertainties of the design, but also those related to the actual situation of the structure with respect to its preservation and efficiency.

In this case it is clearly necessary to reduce as much as possible the extension of the transducer network; at the same time the choice of the monitoring points has to enable the determination of maximum values of the response.

For such choice it is useful to consider, if available, the results of a validated numerical model of the dam and the results of *in situ* forced vibration tests, through which the dynamic parameters are obtained.

At its higher level, surveillance includes the objective of obtaining, besides the response values, some of the parameters which characterise the dynamic behaviour of the structure (natural frequencies, modal shapes, damping, hydrodynamic pressures, etc.). This allows a direct validation of the computing codes which are used to check the structure after the earthquake. Moreover - from a scientific point of view - it is thus possible to gather information on the actual behaviour of the dam-foundation-reservoir system under high stress levels.

In general, however, the seismic surveillance must allow the evaluation of the type and amount of the occurred damage, the assessment of the capability of the structure to continue to perform its duty, and the definition of the scope of further investigation and the remedial measures to be taken, if necessary.

For that purpose, obviously all other relevant information from other sources, namely that from inspections and from the exploitation of static surveillance systems (displacements, joint and crack movements, seepage, leakage, uplift) must be taken into account.

### **2.1.2. Improvement of aseismic design, construction and operation of dams**

The seismic surveillance of the dams, although not yet widely adopted, has already supplied very valuable data for the community of the specialists in this field.

These data show that the present analysis and design procedures are reasonably accurate for the prediction of the seismic response: however, the need for a better comprehension of some important phenomena and a larger quantity of data for more sophisticated design methods still remains.

To this subject, it is worth remembering some of the most important problems still open :

- the **definition of the seismic input** : the effects on the design earthquake (in particular as far as intensity, PGA (peak ground acceleration) and spectral shape are concerned) of source mechanisms, seismic waves paths, local geology, site amplification, canyon shape etc.;

- **l'interaction entre la structure et la fondation** : en particulier, dissipation de l'énergie rayonnante, possibilité de liquéfaction du sol, etc. ;
- le **comportement non linéaire du corps du barrage**, résultant des caractéristiques des matériaux (de grande importance dans le cas de barrages en remblai) ou de la présence de joints ;
- **l'interaction hydrodynamique** entre le barrage et la retenue, et autres ouvrages annexes immergés.

Il s'ensuit que seule la disponibilité de données recueillies dans des conditions bien connues et au cours de forts séismes peut fournir l'information nécessaire à la compréhension des paramètres jouant un rôle important dans de tels séismes, et donc permettre d'affiner les codes de calcul et les critères de projet.

## 2.2. ÉVALUATION DE L'OPPORTUNITÉ DES OBSERVATIONS

La décision d'installer un dispositif de surveillance doit, bien entendu, répondre aux prescriptions des règlements officiels existants qui, toutefois, imposent très rarement une telle installation. Le plus souvent, la décision est laissée au maître d'ouvrage de l'aménagement et s'appuie sur une analyse coût - bénéfices.

En ce qui concerne les coûts, il est nécessaire de prendre en compte, non seulement ceux relatifs à l'achat et à l'installation des appareils, mais également ceux, souvent sous-estimés, correspondant à l'entretien du dispositif et au traitement des données.

Les bénéfices concernent principalement la possibilité de contrôler le risque sismique de dégâts ou de rupture de l'ouvrage et de gérer correctement la situation critique en résultant ; en particulier, un accès facile aux données fournies par les appareils de mesure, ainsi qu'un jugement raisonné, constitueront la base pour la prise de bonnes décisions par le maître d'ouvrage. Des décisions prises de cette manière seront plus justifiables vis-à-vis des autorités de contrôle et du public.

L'installation d'un dispositif de surveillance présente, en outre, l'avantage de fournir une grande quantité d'informations pouvant être utilisées avec profit pour l'amélioration des procédures de projet.

Il est évident que de telles évaluations sont souvent effectuées en se basant sur un jugement personnel, parfois en dehors d'une analyse technique précise, étant donné que d'autres considérations peuvent avoir également une grande influence.

D'un point de vue technique, les considérations les plus importantes portent sur le danger potentiel de l'aménagement pris dans son ensemble et sur les paramètres s'y rapportant : cartes des zones sismiques précédemment établies, dimensions du barrage et matériaux de la cuvette de la retenue, type de barrage et méthode de construction, en tenant compte de la sensibilité relative aux dégâts d'origine sismique, état réel en termes d'âge et d'évolution des contraintes, risques vis-à-vis de la population autour du site.

Ces facteurs font l'objet des commentaires suivants :

### **Séismicité du site**

L'utilisation de cartes de zones sismiques ou de séismicité, ou la prise en considération du niveau d'exposition aux séismes, seront des éléments

- the **interaction between structure and foundation** especially as to the radiation energy dissipation, possibility of soil liquefaction, etc.;
- the **non-linear behaviour of the dam** body as a consequence of the material characteristics (of remarkable importance in case of fill dams), or the presence of joints;
- the **hydrodynamic interaction** between dam and reservoir, and any other immersed appurtenant structures.

It follows that only the availability of data gathered in well known conditions and during strong seismic events can give the information necessary to understand the ways and the parameters playing an important role in such phenomena, and consequently to refine the computer codes and the design criteria.

## **2.2. EVALUATION OF OPPORTUNITY FOR OBSERVATION**

The decision of installing a surveillance system should obviously fulfil the requirements of the existing official regulations, which - however - very seldom impose the installation. More frequently, the decision is left to the Owner of the plant, and is based on a cost-benefit analysis.

As to the costs, it is necessary to take into account not only those related to the purchase and installation, but also those, often underestimated, incurred for the maintenance of the system and the treatment of the data.

The benefits are mainly related to the possibility of controlling the seismic risk of a possible damage or failure of the structure, and correctly manage the consequent emergency situation; in particular ready access to data from instrumentation, together with reasoned judgement, will provide the basis for good decisions on the part of the owner. Decisions reached in such a manner will tend to be more defensible to both regulators and the public.

In favour of the installation of a surveillance system, moreover, should be considered the important advantage of the availability of a large number of information, which can be profitably used for the improvement of the design procedures.

It is clear that such evaluations are often taken on the basis of personal judgement, in some case beyond a precise technical analysis, since other considerations too may have a remarkable weight.

From a technical point of view, the most important considerations are related to the potential dangerousness of the plant as a whole, and to the relevant parameters: previously established seismic zoning, dimensions of the dam and reservoir foundation material, type of dam and construction, with consideration of relative susceptibility to seismic damage, actual state in terms of age and stress history, risks related to the density of population around the site.

Some comments are developed about those factors in the following:

### **Site seismicity**

Use of seismic zoning or seismicity maps, or consideration of relative seismic exposure should always be a fundamental consideration when determining whether

fondamentaux pour décider si un dispositif de surveillance sismique est nécessaire ou non. Si la zone sismique présente une faible probabilité de subir de fortes secousses sismiques pendant la durée de vie de l'ouvrage, l'installation d'appareils pour fortes secousses ne se justifie pas sur les plans économique, technique et politique.

Il sera utile de tenir compte des failles actives connues. Toutes choses égales par ailleurs, lorsqu'un choix doit être effectué, les barrages situés à proximité de failles considérées comme actives, mais dont les mouvements ont des périodes de retour excessivement longues, présenteront des priorités d'installation d'appareils de mesure plus faibles que les barrages situés près de failles actives avec mouvements de période de retour plus courtes.

### **Dimensions du barrage et de la retenue**

Les dimensions du barrage, en particulier sa hauteur, traduisent l'importance de l'ouvrage. En général, plus le barrage sera haut et plus la retenue sera grande, plus le potentiel de dégâts dus à une rupture sera important, et donc plus les problèmes de stabilité seront préoccupants. Tous enregistrements significatifs concernant des barrages de grande hauteur et des retenues de grande capacité seront d'importantes contributions à la constitution d'une base de données de fortes secousses.

En ce qui concerne l'étude de la séismicité induite, l'expérience actuelle, bien qu'elle ne soit pas complètement concluante, semble indiquer une plus grande manifestation de ce phénomène dans le cas de retenues profondes et de grande capacité. Aussi, dans le cas d'importants aménagements, spécialement si les versants de la retenue présentent des caractéristiques géologiques et tectoniques particulières, l'installation d'un réseau de sismographes pour la détection de la séismicité induite peut être justifiée, même dans les zones de séismicité naturelle faible ou modérée.

### **Matériaux de la fondation**

Des données sur les réponses sismiques, provenant de barrages fondés sur tous types de fondation, sont nécessaires. Il importe également d'avoir plus d'informations sur la propagation des ondes sismiques à travers des fondations constituées de roche massive, de roche stratifiée, ou de matériaux de sol, ainsi que sur les effets en résultant sur la réponse dynamique du barrage. La présence de sols de fondation liquéfiables et la nécessité de connaître leur réponse aux secousses sismiques sont d'autres paramètres intervenant dans l'installation d'appareils pour fortes secousses.

### **Méthodes de construction et types de barrages existants ou nouveaux**

Diverses techniques de construction, mises en œuvre au cours des 100 ans écoulés, ont conduit à des profils en travers uniques et complexes de barrages. La sécurité de barrages dont la conception est inhabituelle, tels les barrages par remblayage hydraulique, les barrages en remblai avec talus raides ou les barrages en

or not to deploy an earthquake surveillance system. If the seismic zone is such that little potential exists for obtaining useful strong motion records during the lifetime of the structure, then the economic, technical and policy justification for strong motion instrument installation does not exist.

It will be useful to take consideration of known active faults in the seismic zone maps. Where other factors are equal, and where a choice must be made, dams located in proximity to faults which are known to be active, but which have excessively long return periods, should be considered to have lower priorities for instrumentation than dams in proximity to faults with shorter return periods.

### **Dimensions of dam and reservoir**

Dimensions of dam, and specially its height, are indexes of its structural importance. Moreover, in general the higher the dam and the larger the reservoir, the greater the damage potential due to failure will be, hence the greater the concerns regarding stability. Any significant records for high dams and large reservoir sites will be important contributions to a strong motion data base.

In what concerns study of induced seismicity, existing experience, although not completely conclusive, seems to show a greater incidence of the phenomenon in cases of large and deep reservoirs. Hence, in case of important projects, specially if particular tectonic and geologic characteristics of slopes in the reservoir area are shown, the installation of seismograph networks for detection of induced seismicity may be justified, even in zones of moderate or low natural seismicity.

### **Foundation materials**

Seismic response data are needed from dams founded on all types of foundations. More information are needed on seismic wave propagation through foundations of both massive and layered rock and soil materials and the subsequent effects on dynamic response of the dam. The presence of potentially liquefiable foundation soils, and the need to understand their response to earthquake shaking are other considerations for installing strong motion instruments.

### **Method of construction and type of existing or new dams**

Various types of construction techniques over the past 100 years have developed unique and complicated dam cross-sections. Safety of dams whose designs are unusual, such as hydraulic fill structures, or embankment dams with steep slopes or structurally complex concrete dams, such as thin-arch, multiple arch,

*béton de structure* complexe (par exemple, barrage à voûtes multiples, barrage à contreforts et dalles planes), peut nécessiter des enregistrements pour comparer les mouvements de réponse réels et calculés, ce qui peut donc justifier la mise en place d'appareils pour fortes secousses.

Des enregistrements de réponse plus nombreux sont également nécessaires pour améliorer les méthodes d'évaluation de la sécurité de barrages existants qui ont été réexaminés en utilisant les méthodes actuelles d'analyse de la stabilité dynamique et ont nécessité des modifications pour augmenter leur résistance vis-à-vis des charges sismiques.

and slab and buttress types, may require records for comparisons of actual and calculated response motions and, therefore, may justify placement of strong motion instrumentation.

More response records are also needed to improve evaluation methods of the safety of existing dams, that have been re-evaluated using present day methods of dynamic stability analyses and were found to require modification to increase their resistance to seismic loading.

---

## 3. DÉFINITION DU RÉSEAU DE CAPTEURS

---

### 3.1. ASPECTS GÉNÉRAUX DU PROBLÈME

Lorsque les objectifs de la surveillance ont été précisés en se basant sur les considérations examinées ci-dessus, le projet du réseau de capteurs peut être établi de façon réfléchie et correcte, en choisissant les grandeurs physiques à mesurer (accélérations, vitesses et déplacements, pressions, déformations unitaires, etc.), ainsi que les emplacements, nombre et sensibilité des capteurs.

Selon les objectifs fixés et les divers niveaux de complexité du dispositif de surveillance, les grandeurs présentant de l'intérêt sont :

- le mouvement sismique du sol (défini par les trois composantes de l'accélération) au pied et le long des appuis;
- les valeurs maximales de la réponse dans la zone où les amplifications maximales sont prévues;
- un ensemble de grandeurs et paramètres caractérisant l'état du barrage, tels que des fonctions de transfert et des paramètres modaux.

En ce qui concerne les emplacements et le nombre de capteurs, leur choix détaillé doit être fait cas par cas, en tenant compte des caractéristiques spécifiques du système barrage - fondation - retenue. On doit toutefois considérer d'autres facteurs susceptibles de conduire certaines mesures à ne pas satisfaire à la précision et à la fiabilité requises.

Parmi ces facteurs importants, on peut citer :

- la disponibilité de capteurs appropriés quant à leurs performance, résistance, coût et durabilité;
- la disponibilité d'emplacements de mesure avec accès facile, non affectés par des glissements, crues, etc., et non perturbés par des bruits (trafic, engins, etc.).

### 3.2. MESURE DU MOUVEMENT DE SOLlicitATION SISMIQUE

Il est bien connu que la sollicitation sismique entrant dans le calcul de la réponse de l'ouvrage est définie par le mouvement de « champ libre », c'est-à-dire le mouvement du sol en un point où l'influence d'ouvrages proches ou de caractéristiques topographiques locales inhabituelles est négligeable.

Suivant les techniques de calcul largement acceptées aujourd'hui, l'analyse sismique – dans le cas de barrages en béton ou d'ouvrages en terre fondés directement sur le rocher – est effectuée en adoptant comme mouvement de sollicitation sismique le mouvement enregistré au pied ou le long des appuis.

---

## 3. DEFINITION OF TRANSDUCER NETWORK

---

### 3.1. GENERAL ASPECTS OF THE PROBLEM

Once the objectives of the surveillance have been fixed on the basis of the above discussed considerations, project of the transducers network can be done in a correct and considered way, through the choice of the physical quantities (accelerations, velocities and displacements, pressures, strains, etc.) to be monitored, together with positions, number and sensitivity of the transducers.

According to the fixed objectives, and to the different levels of complexity of the surveillance system, the quantities of interest are :

- the seismic motion of the soil (defined by the three components of the acceleration) at the base and along the abutments;
- the maximum values of the response in the area where maximum amplifications are predicted;
- a set of quantities and parameters characterising the state of the dam such as transfer functions and modal parameters.

As to the positions and number of transducers, their detailed choice has to be made on a case by case basis, taking into account the specific features of the dam-foundation-reservoir system. Some other factors, however, have to be considered which might hinder, and sometimes prevent the carrying out of some measurements with the required accuracy and reliability.

Among these factors, of particular weight are the following :

- the availability of suitable transducers with respect to their performance, strength, cost and durability;
- the availability of measuring positions with easy access, safe from slides, floods, etc., and unaffected by spurious noise (traffic, engines, etc.)

### 3.2. MONITORING OF THE EARTHQUAKE INPUT MOTION

It is well known that the seismic actions to be input in the calculation of the structural response is defined by the “ free field ” motion, that is the motion of the soil in a point in which the influence of nearby structures or of unusual local topography characteristics is negligible.

According to the calculation techniques nowadays widely accepted, however, the seismic analysis – in the case of concrete dams or earthfill structures founded directly on rock – is made using as input motion the motion recorded at the base or along the abutments.

Dans le cas de barrages en remblai fondés sur des dépôts non consolidés, des méthodes de calcul incluant une grande partie des dépôts de fondation au-dessus du rocher sont utilisées; dans de tels cas, il importe de partir du mouvement de champ libre pour obtenir, au moyen d'un processus de « déconvolution », le mouvement correspondant à la base rocheuse. Ainsi, il apparaît que, pour une analyse du barrage après séisme, il n'est pas essentiel de connaître les enregistrements dans le champ libre, alors que la connaissance du mouvement de sollicitation à la base est la donnée nécessaire.

Toutefois, l'information sur le mouvement de champ libre, lorsqu'elle est disponible, est également importante afin d'étudier les causes des variations locales lors de fortes secousses et la manière dont les secousses varient avec la distance depuis la source.

Les mouvements de sollicitation sont définis dans les recommandations comme mouvements du sol induits par le séisme, à la base ou le long des appuis du barrage en question. Sur les sites éloignés de l'épicentre du séisme, les mouvements peuvent être très atténués et modifiés, comparativement au mouvement du sol près de la source sismique. Ces modifications résultent de la distance, de la structure de la croûte terrestre et des types de matériaux que les ondes sismiques doivent traverser entre la source et le site. Pour un barrage situé dans un champ libre, le mouvement du sol peut être amplifié ou atténué selon la direction de propagation des ondes sismiques et la situation géométrique du barrage par rapport au foyer du séisme.

Les appareils destinés à enregistrer les mouvements de sollicitation sismique peuvent être situés à la surface et/ou en sous-sol. Pour un réseau installé en surface, des appareils à une ou plusieurs composantes de mouvement seront situés près du pied aval du barrage et, si le coût le permet, sur les appuis près du barrage.

Les appareils au pied seront installés aussi près que possible de la section maximale. Cependant, sur de nombreux sites de barrages, la mise en place d'appareils en surface, au pied aval, est difficile à réaliser à cause de la présence du remous de la retenue aval, de l'eau des ouvrages de fuite de l'usine hydroélectrique, d'un bassin de dissipation, d'une fosse d'amortissement, d'ouvrages d'évacuation, d'un sol saturé par les percolations, ou d'autres situations. Dans les vallées étroites et profondes, où les barrages sont entièrement fondés sur de la roche, des affleurements rocheux à l'aval, favorables à la mise en place d'appareils, sont souvent difficiles à trouver. Au contact barrage/appui, les conditions topographiques et d'accès limitent parfois les possibilités d'installation des appareils de mesure. Une petite cavité près de la surface dans l'appui ou un replat seront des emplacements propices à l'installation d'appareils.

De nombreux barrages en béton et les fondations de certains barrages en remblai contiennent des galeries de drainage et/ou d'injection. Ces galeries, si elles sont situées dans ou près de la fondation du barrage, sont souvent d'excellents emplacements pour l'installation d'appareils d'enregistrement de mouvements sismiques. De petites niches seront prévues dans les parois de la galerie pour protéger les appareils vis-à-vis du trafic et de l'eau de percolation le long des radiers ou des caniveaux de la galerie. Des galeries peuvent être si humides que les procédures d'entretien régulier introduisent parfois un niveau excessif d'humidité lorsque les boîtes abritant les appareils sont ouvertes. Pour parer à cet inconvénient, certaines galeries ont été équipées de cellules chauffées pour maintenir les appareils secs et opérationnels.

Only in case of embankment dams founded on unconsolidated deposits, computing schemes including a large part of the foundation deposits above rock are used; in such cases it is important to start from the free-field motion to obtain, through a deconvolution process, the motion in correspondence of the rocky base. It is thus clear that, for a post-earthquake analysis of the dam, it is not essential to know the free-field records, while the knowledge of the input motion at the base is the necessary datum.

However, the information about the free-field motion, when available, is important too in order to study the causes of local variations in strong shaking and the manner in which shaking varies with distance from the source.

Input motions are defined in the guidelines as earthquake-induced ground motions at the base or the abutments of the dam under consideration. At far-field sites distant from an earthquake epicentre, motions may be greatly attenuated and modified, in comparison with ground motion near the causative seismic source. These modifications occur as a result of distance, crustal structure, and types of materials that the seismic waves must traverse between the source and the site. For dam sites in the near-field, ground motion may be amplified or attenuated because of seismic wave propagation direction and geometrical relations of the dam site to the earthquake source.

Instruments to record input motion may involve surface or subsurface emplacements, or both. For a surface-mounted array at a dam, one or more input motion components of the array should be located near the downstream toe, and, if costs permit, one or more should be located on the abutments close to the dam.

Instruments at the toe should be located as close to the maximum section as possible. However, for many dam sites, downstream toe surface siting is difficult to attain because of the presence of backwater from downstream reservoirs, tailwater from power plants, stilling basins, plunge pools, outlet works, ground saturated due to seepage, or other features. In deep narrow canyons, where dams may be founded entirely on bedrock, downstream bedrock outcrops suitable for instrument siting will often be difficult to find. At the dam/abutment contact, topographic and access conditions may allow little room for satisfactory instrument placement. A small near-surface chamber in the abutment or a flattened area of the abutment would be desirable instrument sites.

Many concrete dams and the foundations of some embankment dams contain drainage and/or grouting galleries. These galleries, if located at or near the dam foundation, are often excellent sites for input motion instruments. Small alcoves in gallery walls should be provided to protect instruments from traffic and seepage along gallery floors or gutters. Gallery sites can be so humid that regular maintenance procedures can introduce excessive moisture when instrument housings are opened. To mitigate this condition, some galleries have been equipped with heated enclosures to keep the instruments dry and operational.

Les appareils d'enregistrement des mouvements de sollicitation en sous-sol, sur les sites de barrages en remblai, sont parfois placés dans des trous de forage. Ceux-ci peuvent être exécutés à travers le barrage ou depuis le pied du barrage. Lorsque les fondations sont constituées, en totalité ou en partie, de matériaux meubles, ces forages peuvent être utilisés pour installer des accéléromètres au contact ou près du contact remblai/sol de fondation et sol de fondation/rocher. Des accéléromètres sont parfois installés à divers niveaux dans le barrage ou sa fondation en fonction du programme d'analyse prévu.

Toutefois, pour les emplacements d'appareils enregistrant des mouvements de sollicitation de champ libre, des irrégularités ou des conditions exceptionnelles topographiques sont indésirables, et des données d'expérience indiquent que la proximité de versants de vallée ou de parois de canyon affecte les mouvements du sol.

Les sommets de collines subissent une amplification importante par rapport à leur pied pour des fréquences correspondant à des longueurs d'ondes à peu près égales à la largeur de la colline. Les versants de la colline subissent des phénomènes complexes d'amplification - désamplification. Ces tendances semblent exister indépendamment de la structure géologique interne. La théorie et les techniques de modélisation, destinées à prédire les réponses du sommet et des versants d'une colline à une secousse sismique, sont toujours en cours de développement.

Les conditions topographiques du site du barrage doivent donc être étudiées avec soin avant le choix des emplacements des appareils d'enregistrement, de façon que de tels effets indésirables soient évités.

### **3.3. MESURE DE LA RÉPONSE DE L'OUVRAGE**

Le principal objectif de la mesure de la réponse sismique du barrage est d'obtenir les valeurs maximales de la réponse : les capteurs seront donc installés dans les zones où ces valeurs maximales sont prévues.

Ce choix est cependant difficile car, en vue de diminuer les coûts, le nombre de capteurs doit être aussi réduit que possible, tout en maintenant significatives et interprétables les données recueillies. Le choix correct se basera donc sur les résultats d'un modèle numérique du barrage validé à partir des résultats obtenus, par exemple, au moyen d'essais de vibration forcée. Si un tel modèle n'est pas disponible, on se référera à des données expérimentales. Les accélérations maximales se manifestent généralement à la crête de la section transversale la plus haute; dans le cas de barrages-voûtes soumis principalement à des sollicitations sismiques latérales (transversales par rapport au canyon), de fortes accélérations se produisent parfois également dans les parties latérales, où la réponse des modes antisymétriques peut prendre des valeurs élevées. Dans ces cas, les composantes latérales de la réponse en accélération, généralement de faible importance, peuvent devenir notables.

Il faut cependant noter que, du fait que de nombreux barrages sont dissymétriques en raison de différences de pente des appuis, de lits de cours d'eau

Less frequently, subsurface input motion instruments for embankment dams are placed in boreholes. These boreholes may be drilled through the dam or drilled at the dam toe. When dam foundations consist wholly or partially of soils, boreholes may be utilised to place accelerometers at or near the embankment/foundation soil and the foundation soil/rock contacts. More accelerometers may be installed at various levels within a dam or foundation depending on the planned scope of analysis.

However, for input and free-field motion instrument sites, irregularities or extremes in topography are undesirable, and empirical data indicate that the proximity of valley slopes or canyon walls affect ground motion.

Hilltops experience significant amplification with respect to their bases for frequencies corresponding to wavelengths about equal to the width of the hill. Hillsides undergo complex amplification-deamplification phenomena. These trends seem to be present regardless of internal geologic structure. Theory and modelling techniques to predict hilltop and hillside response to earthquake shaking are still being developed.

The topographic environment of the dam must be therefore carefully reviewed prior to selecting locations for the recording instruments, so that such undesirable effects are avoided.

### **3.3. MONITORING OF THE STRUCTURAL RESPONSE**

The main objective of the measurement of the seismic response of the dam is to obtain the maximum values of the response : therefore, the transducers have to be placed where these maximum values are predicted.

This choice is however critical since – in order to reduce costs – the transducer number has to be as small as possible, provided the collected data remain meaningful. The correct choice has then to be based on the results of a numerical model of the dam validated by the results obtained, for instance, by means of forced vibration tests. Should such a model be unavailable, reference should be made to past experience. Maximum accelerations usually occur at the crest of the highest transverse cross-section; only in case of arch dams subjected mainly to lateral (transverse with respect to the canyon) seismic actions, high accelerations may be expected in the lateral parts too, where the response of the anti-symmetrical modes may assume large values. In these cases, the lateral components of the response acceleration, usually of minor importance, could become remarkable.

It has to be observed, however, that since many dams are asymmetrical because of differences in abutment slopes, off-valley-centre stream channels, or other

situés en dehors du milieu de la vallée, ou d'autres irrégularités topographiques et/ou géologiques ou dans les matériaux de fondation, la section maximale peut ne pas correspondre au centre géométrique de la crête du barrage.

Il s'ensuit qu'au moins un capteur doit être placé dans la section transversale maximale; cependant, d'autres appareils situés le long de la crête, sur le parement aval ou à l'intérieur du barrage sont souvent souhaitables pour vérification, applications particulières, ou à cause de limitations d'emplacement.

Dans le cas de barrages en remblai, il faut noter que, du fait de la géométrie et du comportement non linéaire des matériaux, l'accélération maximale peut se produire en des points le long de la hauteur et pas nécessairement en crête.

L'installation d'appareils pour étudier le comportement de diverses zones de matériaux peut également présenter de l'intérêt; ce choix, qui de préférence s'appuiera sur un modèle mathématique, sera propre à chaque barrage et dépendra du zonage des matériaux, de la géométrie du barrage, des types de matériaux des diverses zones et de la nature de la fondation.

Ces capteurs seront installés en réalisant des trous de forage, ou mis en place au cours de la construction du barrage en utilisant des tubes montés bout à bout et donnant passage aux câbles de liaison. Les galeries supérieures situées dans de nombreux barrages en béton constituent des emplacements pour les appareils si l'installation de ceux-ci le long de la crête est difficile.

L'emplacement idéal des appareils pour fortes secousses (solicitation et réponse) sera situé dans une même section, transversale à l'axe longitudinal du barrage. Les enregistrements des appareils ainsi situés fourniront les données de base les plus directes pour l'analyse comparant les réponses calculées et réelles du barrage aux charges sismiques. Les composantes transversales des mouvements sismiques enregistrés sont généralement considérés de première importance. D'autres parties de la crête du barrage, en dehors de la section maximale, peuvent être équipées d'appareils si une analyse tridimensionnelle est prévue.

Pour un niveau plus élevé de surveillance, si l'établissement d'un modèle numérique validé est conseillé en vue d'étudier les effets sismiques sur le barrage, ou pour une amélioration des connaissances sur les phénomènes se manifestant, il est nécessaire d'installer un réseau plus étendu de capteurs comprenant :

- Des cellules de pression et des hydrophones pour la mesure des pressions hydrodynamiques sur le parement amont, en vue d'étudier l'interaction barrage - retenue.

Au moyen de ces mesures, les formules simplifiées couramment adoptées (Zangar, etc.) peuvent être validées et des renseignements obtenus sur l'influence de la compressibilité du fluide (présence de résonances de la retenue). Il est recommandé de répartir les capteurs le long de la section transversale maximale du barrage.

- Un plus grand nombre d'accéléromètres, lorsqu'il y a lieu de connaître les caractéristiques dynamiques (fréquences naturelles, formes modales et amortissements). Cela conduit à un traitement plus complexe des données.

En ce qui concerne le traitement des données, la réponse du barrage est généralement analysée en vue de déterminer les facteurs d'amplification, la

topographic or foundation material and/or geologic structure irregularities, the maximum section may not be at the geometric centre of the dam crest.

It follows that at least one transducer has to be placed in correspondence to the maximum cross-section; other instrument locations along the dam crest, on the downstream face of the dam, or within the dam, may be however desirable for backup, special applications, or simply because of siting limitations.

In case of embankment dams it is necessary to take into account that, due to the geometry and to the non linear material behaviour, the maximum acceleration can occur in points along the height not necessarily at the crest.

It may be also of interest to install specific instruments to study the behaviour of selected material zones; this choice, to be preferably done on the basis of a mathematical model, is specific for each individual dam and depends upon overall zoning and geometry of the dam, types of materials used in the zone, and the nature of the foundation.

These transducers would have to be installed through the use of boreholes, or could be installed during construction using riser pipes through which connecting cables can be threaded. Upper galleries in many concrete dams may allow a choice of internal locations if only poor sites are available along the crest.

Ideally, response and input or base strong motion instruments will be located in the same cross section transverse to the longitudinal axis of the dam. Records from instruments so located will provide the most direct basis for analysis that compare calculated with actual responses of the dam to earthquake loading. The transverse components of the recorded earthquake motions are generally considered to be of primary importance. Other parts of the dam crest away from the maximum section may be instrumented if three dimensional analysis is intended.

For a higher level of surveillance, if the setting up of a validated numerical model is advisable, by means of which the seismic effects on the dam have to be assessed, or for purposes of improving the knowledge of the occurring phenomena, a much wider transducer network need to be installed, which includes :

- Pressure cells and hydrophones for the measurement of hydrodynamic pressure on the upstream face, in order to study the fluidodynamic dam-reservoir interaction.

By means of these measurements the simplified relationships currently adopted (Zangar, etc.) can be validated, and information on the influence of the fluid compressibility (presence of reservoir resonances) can be obtained. Transducers are to be preferably displayed along the maximum cross-section of the dam;

- A higher number of accelerometers, when the dynamic characteristics (natural frequencies, modal shapes and dampings) of the dam are requested. This implies an increasing complexity of the subsequent data processing.

As to the processing of the data, the dam response is commonly analysed with the aim of determining amplification factors, correlation between the excitation and

corrélation entre excitation et réponses, et les paramètres modaux; cela est habituellement effectué au moyen d'analyses complexes dans le domaine des fréquences ou du temps, faisant appel à des programmes spéciaux « off-line ».

Le nombre de capteurs et leurs emplacements doivent permettre une détection correcte des formes modales des premiers modes de vibration.

Afin de réduire le poids de ces deux problèmes, il est recommandé d'exécuter préalablement des essais dynamiques in situ permettant la détermination des paramètres modaux à partir d'un large ensemble de données fiables.

Un petit nombre d'accéléromètres sur la crête est alors suffisant pour détecter les fréquences naturelles au moyen de simples opérations d'analyse spectrale, tandis que les formes modales peuvent être contrôlées en quelques autres points sur la crête et le long de deux consoles (une pour les modes symétriques et l'autre pour les modes antisymétriques).

Sur les barages en béton, des mesures des mouvements éventuels des joints radiaux – dont le comportement est presque inconnu – sont également importantes; si cela est économiquement possible, on installera des capteurs de déplacement, principalement sur la partie supérieure du barrage.

- Des mesures complémentaires sont souhaitables : mesures de niveau d'eau, de température, de sous-pressions, de pressions interstitielles, etc., qui, comme on le sait, influent sur les conditions « initiales » du barrage. Par exemple, dans le cas d'un barrage-voûte, la masse participant à la vibration dépend du niveau de la retenue et la raideur dépend des conditions d'ouverture des joints, cette ouverture étant elle-même influencée par le niveau de retenue et les températures du béton et de l'eau.

### **3.4. AUSCULTATION DES OUVRAGES ANNEXES**

L'aménagement hydraulique comprend, outre le barrage, divers ouvrages et organes, tels que les tours de prise d'eau, les évacuateurs de crue, les vannes et autres matériels mécaniques, dont l'auscultation sera comprise dans le dispositif de surveillance. Les critères d'évaluation pour la prise en compte de ces ouvrages et organes sont identiques à ceux déjà exposés, en y incluant leurs problèmes spécifiques : hydroélasticité, emplacement (à l'extérieur ou en souterrain), interaction dynamique avec la retenue, stabilité, etc.

### **3.5. AUSCULTATION DE LA RETENUE**

Lorsqu'à proximité de la retenue existent des zones présentant un risque d'instabilité sous l'effet de séismes (telles que versants raides, zones sujettes à glissement, etc.), il est recommandé que de telles zones soient auscultées au moyen d'appareils appropriés, capables de détecter leurs mouvements éventuels. Un dispositif particulier de surveillance sera aussi prévu pour mesurer les mouvements de failles susceptibles d'affecter le barrage.

De plus, l'auscultation de la retenue permet une meilleure caractérisation de la sismicité du site et, par conséquent, une définition plus sûre du séisme de projet; en

the responses and modal parameters; this is usually done by means of complex analyses in frequency or time domain, using off-line special programmes.

As to the transducers, their number and positions have to allow a correct detection of the modal shapes of the first vibration modes.

In order to reduce the weight of these two problems, it is advisable to perform previously in situ dynamic tests, which allow the determination of the modal parameters based on a wide set of reliable data.

A small number of accelerometers on the crest is then sufficient to the surveillance system in order to detect the natural frequencies by means of simple operations of spectral analysis; while the modal shapes can be checked in few other points on the crest and along two cantilevers (one for the symmetrical and one for the antisymmetrical modes).

On concrete dams, measurements of possible movements of radial joints – the behaviour of which is almost unknown – are also important: if economical considerations allow it, use will be made of displacement transducers placed mainly on the upper part of the dam;

- Additional measurements are advisable – for instance – of water level, temperature, uplift pressures, pore water pressures etc., which - as it is well known - affect the “ initial ” conditions of the dam. As an example, in case of an arch dam, the mass participating to the vibration depends on the impounded water level and the stiffness depends on the joint opening conditions, in turn influenced by water level and concrete and water temperatures.

### **3.4. MONITORING OF THE APPURTENANT STRUCTURES**

The hydraulic plant comprises – besides the dam – several different structures such as intake towers, spillways, gates and other mechanical equipment, the monitoring of which should be included in the surveillance system. The evaluation criteria for the inclusion of these structures are similar to those already set forth taking into account their specific problems : hydro-elasticity, half-burying, or burying of them, dynamic interaction with fillings of dams, stability etc.

### **3.5. MONITORING OF THE RESERVOIR**

When near to the reservoir there are areas presenting instability hazard (such as steep slopes, sliding prone zones etc.) mobilised by the earthquake, it is advisable that such areas be monitored by the surveillance system through suitable instruments able to detect their possible movements. Specialised surveillance should be also provided to measure faults movements possibly affecting the dam.

Moreover, the monitoring of the reservoir allows a better characterisation of the site seismicity, and consequently a more reliable definition of the design

même temps, elle peut détecter les changements éventuels de sismicité causés par le remplissage de la retenue (sismicité induite).

La détection de la sismicité induite par une retenue peut comporter deux phases :

La phase 1 comprend des études sur l'histoire de la sismicité et sur les structures géologiques de la retenue et de ses environs, dans le but d'identifier des failles actives éventuelles. S'y ajoutent des études sur l'activité sismique afin d'évaluer la sismicité avant remplissage de la retenue, ce qui peut être réalisé en utilisant des réseaux mobiles de sismomètres à haute sensibilité avec liaison radio. Cette phase fournit des informations pour décider si d'autres mesures sont nécessaires.

Dans l'affirmative, une seconde phase est entreprise en débutant au moins un ou deux ans avant le remplissage. La tâche la plus importante est l'installation d'un réseau fixe de sismomètres, d'autres mesures, telles que : nivellement précis, appareils pour détecter les mouvements de failles actives, ainsi que des études de stabilité des versants de la retenue, pouvant être effectuées.

Comme il y a très peu d'enregistrements de changements de sismicité dus au remplissage de retenues, des appareils pour micro-secousses, destinés au calcul des paramètres de foyer (situation de l'épicentre, profondeur du foyer, durée et vitesse de propagation) présentent un grand intérêt.

La conception et l'installation d'un tel réseau d'appareils posent plusieurs problèmes techniques et économiques. Des erreurs doivent être évitées dans le calcul des paramètres de foyer sus-mentionnés.

Les principales sources d'erreurs sont les suivantes :

i) **manque de précision dans la mesure du temps** – Cette question revêt une grande importance dans le calcul de la distance de l'épicentre. Lorsqu'un signal temps radio est disponible, il devra être utilisé même si le coût des opérations de traitement est augmenté. Dans le cas contraire, on veillera à ce que le système de mesure du temps soit sûr à un dixième de seconde près, afin de limiter les erreurs sur l'emplacement de l'épicentre à moins de un kilomètre.

ii) **faible rapport signal/bruit** – Les emplacements présentant des niveaux élevés de bruit (naturels ou non) seront évités. Étant donné que les enregistrements des séismes débutent à de faibles niveaux qui ensuite augmentent progressivement, la présence de bruits rend plus difficile l'identification de l'arrivée des ondes initiales émergeant lentement du bruit de fond.

iii) **manque de connaissance des vitesses de propagation** dans les couches de la croûte terrestre. Cela est un inconvénient très sérieux car l'emplacement de l'hypocentre devient pratiquement impossible à déterminer. Ces vitesses de propagation peuvent être connues en effectuant des sondages sismiques profonds sur 3 ou 4 profils dans une zone de quelques dizaines de km à partir de la retenue. Mais il s'agit là d'une méthode très coûteuse. Un autre moyen de recueillir ces informations est d'enregistrer les vibrations produites par des explosifs au cours des travaux de construction. Cette méthode est beaucoup moins coûteuse, mais elle nécessite que les appareils d'enregistrement soient disponibles dès le début des travaux.

earthquake; at the same time, it can detect possible changes in seismicity caused by the impounding (induced seismicity).

The detection of reservoir induced seismicity may be performed in two phases :

Phase 1 included studies on historical seismicity and surveys of reservoir and surrounding geological structures, aiming at identification of possible active faults. It also includes studies on seismic activity to evaluate the pre-impounding seismicity which may be performed by using portable networks of radio linked high sensitivity seismometers. This phase provides the information upon which it is decided if further studies are needed.

In this case a second phase is carried out starting at least one or two years prior to the impounding. The most important task is the installation of a permanent network of seismometers and other measures may be performed such as: precise levelling, use of instrumentation to detect active fault movements, and reservoir slope stability studies.

As there are very few records of changes in seismicity due to impounding of reservoirs, micro tremor instrumentation, aiming at computation of focal parameters (epicentre location, depth, duration and propagation velocity) is of the utmost importance.

The installation and design of such a network has to deal with several issues of technical and economical type. Errors must be avoided in computation of the above mentioned focal parameters.

The main sources of errors are :

i) **lack of precise time keeping** – it is a very important issue in computation of epicentral distance. Whenever a radio time signal is available, it should be used even if it raises costs in hardware. Otherwise, attention should be paid so that the time system used is reliable to a tenth of a second, to keep the errors in epicentre location within a kilometre;

ii) **low signal/noise ratio** – locations where high levels of noise are present, either natural or man made, should be avoided. As earthquake records usually start at low levels and gradually increase, the presence of noise makes it more difficult to identify the actual arrival of the initial P waves that emerge slowly from the background noise;

iii) **lack of knowledge of propagating velocities** in crustal layers - this is a very important drawback as location of hypocenters becomes virtually impossible. This information can be obtained by deep seismic sounding along 3 or 4 profiles within an area of a few tens of kilometers from the reservoir. This is a very expensive method. Another way of gathering this information is to use records of vibration produced by explosions during construction works. This method is much less expensive but it implies that the equipment is available very soon during construction.

En ce qui concerne l'emplacement et le nombre de stations sismiques, on peut émettre quelques règles. En général, il est toujours préférable d'avoir un grand nombre de stations, même ne comportant qu'une seule composante verticale, plutôt que peu de stations avec trois composantes.

Les séismes induits se produisant le plus souvent à l'intérieur de la retenue, à proximité de sa zone la plus profonde, les stations sismiques seront installées au voisinage de cette zone. Le nombre minimal de stations permettant d'obtenir une estimation fiable des paramètres de foyer est de cinq.

Cependant, des questions économiques importantes peuvent conduire à l'installation d'un plus petit nombre de stations. Si une seule situation est utilisée, elle sera du type « à trois composantes », afin que l'emplacement de l'épicentre puisse être déterminé avec une assez bonne approximation. L'utilisation de deux stations situées sur les versants opposés de la retenue, même si elle ne permet pas un calcul exact de l'emplacement de l'épicentre, facilite la distinction du début du mouvement émergeant du bruit de fond. Un réseau de trois stations, formant un triangle dont les côtés sont à peu près identiques aux dimensions de la retenue, permet de localiser de façon satisfaisante l'épicentre si celui-ci se situe à l'intérieur du réseau. Le système de surveillance doit être également utilisé en corrélation avec les besoins de zonage sismologique.

Une ou deux stations sismiques seront équipées de sismomètres à faible gain, afin d'enregistrer les secousses d'amplitude modérée susceptibles de saturer les appareils à gain élevé, et de façon qu'on puisse corréler ces enregistrements avec ceux des appareils pour fortes secousses situés dans le barrage.

For location and number of seismic stations a few rules can be pointed out. As a first rule of thumb, one can say that it is always preferable to have a larger number of stations, even with only one vertical component, rather than fewer stations with the three components.

As induced earthquakes are more likely to occur within the reservoir in the vicinity of its deepest part, the seismic stations should be located around it. The minimum number of stations needed to obtain reliable estimates of focal parameters is five.

However, as economic issues may be important, fewer stations are also used. If only one station is to be used, it should be of the three component type, so that a fairly good approximation of epicentre location can be done. The use of two stations, even though it doesn't allow exact computation of epicentre locations, located in opposite sides of the reservoir, helps to distinguish the starting of motion from the background noise. A three station network, defining a triangle with sides about the size of the reservoir allows good location of epicentres if they lie within the net. The surveillance system must also be used in correlation with seismological zoning needs.

One or two of the seismic stations should have low-gain seismometers so that one can measure moderate amplitude quakes that eventually will saturate high-gain instruments, and so that there could be correlation between these records and those of strong-motion instruments in the dam itself.

---

## 4. CONCEPTION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION ET CHOIX DES APPAREILS

---

### 4.1. CONDITIONS FONDAMENTALES REQUISES

Du point de vue conceptuel, un dispositif de surveillance remplit trois fonctions :

- production du signal électrique par le capteur,
- conditionnement, transmission et réception du signal,
- contrôle du processus de surveillance et – éventuellement – prétraitement des données.

Ces trois fonctions sont remplies, dans les dispositifs importants, par trois unités différentes ou sous-ensembles, chacun ayant des spécifications propres quant à leurs raccordements électriques et leurs performances. Outre leur capacité à résister aux séismes les plus sévères, ils doivent satisfaire à d'autres conditions dont les plus importantes sont indiquées ci-après :

#### **Fiabilité**

Il est évident qu'un dispositif automatique de surveillance doit être le moins possible hors service. La fiabilité peut être augmentée par l'utilisation de composants de première qualité, ou par une redondance des composants critiques; dans certains cas, cependant, des résultats identiques peuvent être obtenus au moyen de simples dispositions consistant à protéger avec soin le système de surveillance contre les nuisances du milieu (décharges électriques, surtensions, températures élevées, humidité, poussière, etc.). Afin d'accroître la fiabilité, il est recommandé de prévoir une équipe de techniciens bien formés, connaissant parfaitement l'appareillage et chargés d'effectuer périodiquement l'entretien et l'étalonnage des appareils de mesure.

#### **Entretien**

Le risque d'une mise hors service ne pouvant être évité malgré toutes les mesures prises pour le réduire, la conception des éléments du dispositif doit viser à rendre les opérations d'entretien simples et faciles. À cet effet, il y a lieu d'adopter des éléments modulaires et standard; de plus, le système comprendra une unité de diagnostic interne facilitant la détection automatique de dysfonctionnements.

#### **Possibilité d'extension du dispositif**

Au cours de la durée de vie d'un ouvrage, il est souvent nécessaire d'améliorer le dispositif de surveillance en y ajoutant des capteurs. Cela peut résulter d'un

---

## 4. DESIGN OF THE MONITORING SYSTEM AND CHOICE OF THE HARDWARE

---

### 4.1. BASIC REQUIREMENTS

From a conceptual point of view, three different functions are performed by a surveillance system:

- generation of the electrical signal by the transducer;
- conditioning, transmission and acquisition of the signal;
- supervision of the surveillance process, and – possibly – pre-processing of the data.

These three different functions are performed, in large systems, by three different units or sub-systems, each of them having specific requirements as to their electric connections and performances. Some basic requirements beyond the capability of surviving even to the most severe earthquake are common to all of them. The most remarkable are :

#### **Reliability**

It is an obvious requirement for an automatic system aimed at the surveillance, that the out of work periods be reduced to a minimum. Reliability can be increased by the use of high class components, or by a redundancy of the critical components; in some cases, however, similar results can be achieved by means of simpler provisions consisting in a careful protection of the system from the environment harms (electric discharges, over voltages, high temperatures, humidity, dust, etc.). In order to increase reliability, it could be convenient to foresee the existence of a team of well trained technicians fully conversant with the equipment periodically doing maintenance and calibration of the instrumentation.

#### **Maintenance**

Since the risk of an out of service cannot be avoided, notwithstanding all the measures which can be taken to reduce it, the design of the system parts has to be done in such a way as to make simple and straightforward their maintenance operations. To this aim, modularity and standardisation of the parts have to be adopted; moreover, the system should include an internal diagnostic section which facilitates the automatic detection of malfunctions.

#### **Expandability**

During the operating life of a structure, it is often necessary to improve the system with additional transducers. This could be the consequence of a change with

changement dans le temps du comportement de l'ouvrage, de la manifestation de nouveaux problèmes, de la disponibilité de nouveaux capteurs sur le marché. La conception du dispositif doit donc permettre d'y ajouter facilement de nouveaux capteurs.

### **Simplicité d'utilisation**

Les interfaces ordinateur – logiciel seront conçues de façon à réduire les difficultés d'exploitation ou les fausses interprétations des informations et alertes fournies par le dispositif.

## **4.2. CAPTEURS**

L'appareillage actuellement disponible est très riche et couvre pratiquement tous les besoins techniques dans le domaine de l'enregistrement des grandeurs physiques présentant de l'intérêt. Parmi les caractéristiques électriques à prendre en compte lors du choix des capteurs, les suivantes méritent d'être signalées :

### **Stabilité**

Il s'agit d'une propriété très importante pour l'enregistrement, sur une longue période, de grandeurs statiques, car la dérive électrique d'un capteur peut masquer ou, au contraire, faire croire à une modification de structure, telle que fluage, déformations plastiques, etc.

### **Sensibilité**

Les capteurs doivent être capables d'enregistrer (sans être saturés) les valeurs les plus élevées prévues pour les grandeurs à mesurer; en même temps, certaines analyses approfondies, spécialement dans le domaine dynamique, nécessitent l'enregistrement précis, sans altération, des valeurs les plus faibles.

### **Réponse en fréquence**

La représentation correcte d'un phénomène dynamique par les capteurs et la chaîne de mesure dépend beaucoup de cette propriété. Bien entendu, il est nécessaire que la réponse en fréquence des capteurs soit supérieure à la fréquence maximale de l'ouvrage. En outre, lorsque la composante statique présente également de l'intérêt – comme, par exemple, pour les déformations ou les pressions –, une réponse partant de 0 cycle par seconde est prescrite. Dans un tel cas, le choix des capteurs peut devenir critique, en raison des différentes valeurs des composantes statique et dynamique du signal à enregistrer.

#### **4.2.1. Accélérographes**

##### *4.2.1.1. Types d'appareils*

Au cours des deux décennies écoulées, depuis le début des années 70, des progrès importants ont été enregistrés dans les appareils pour fortes secousses. Les

time in the structural behaviour, of the arising of new problems, as well as of the availability on the market of new transducers. Therefore, the design of the system should be such as to allow that additional transducers could be easily included in its scheme.

### **Simplicity of use**

Both the hardware and software user interfaces have to be designed in such a way as to reduce operating difficulties or wrong interpretations of the information and warnings supplied by the system.

## **4.2. TRANSDUCERS**

The instrumentation available nowadays is very rich, and practically covers all the technical needs of a correct recording of the physical quantities of interest. Among the electrical characteristics to be taken into account when choosing the most suitable transducers, the following are worth a mention :

### **Stability**

This is a very important property for the long time recording of static quantities, since the electrical drift of a transducer may hide, or, on the contrary, let one to suppose that a structural modification is taking place, such as creep, plastic deformations, etc.

### **Sensitivity**

The transducers have to be able to record (without being saturated) the highest expected values for the quantities to be measured; at the same time, some important analyses, especially in the dynamic field, require that the lowest values too be precisely recorded without alterations.

### **Frequency response**

The correct description of a dynamic event by the transducers and the measuring chain strongly depends on this property. Obviously, it is necessary that the frequency response of the transducers be higher than the maximum frequency of the structure. Moreover, when – as, for example – for strain, measurements or pressure – the static component too is of interest, a flat response is required starting from 0 cps. In such an instance, the choice of the transducers may become critical, owing to the different values of the static and dynamic components of the signal to be recorded.

#### **4.2.1. Accelerographs**

##### *4.2.1.1. Types of instruments*

During the past two decades, from beginning of seventies, significant developments have occurred in strong motion instrumentation. Strong motion

fabricants de ceux-ci et les experts en sismologie ont reconnu la nécessité d'obtenir des enregistrements plus nombreux et améliorés dans le domaine des fortes secousses. Plusieurs barrages ayant subi de sévères secousses au cours de séismes, un certain nombre de maîtres d'ouvrage ont souhaité également l'amélioration de tels appareils.

Une diversité d'appareils pour fortes secousses existe maintenant. Lors du choix du (des) type(s) d'appareil(s) à installer sur un barrage, les maîtres d'ouvrage et leurs ingénieurs doivent connaître les caractéristiques, applications et coût de chaque type.

Les accélérographes qui enregistrent l'évolution, dans le temps, de l'accélération des secousses sismiques sur le site sont des appareils pour fortes secousses. Les progrès au cours des 20 dernières années ont conduit à une amélioration des enregistrements, allant des anciens enregistreurs à film analogique à une grande variété d'appareils digitaux du type compact.

Les accélérographes ont été classés en quatre types basés sur leurs systèmes d'enregistrement, tous ayant six caractéristiques communes, comme indiqué dans le Tableau 1. D'autres caractéristiques souhaitables pour les appareils installés sur les barrages sont 1) possibilité d'enregistrer le temps absolu, 2) possibilité d'interconnexion de tous les appareils installés pour une mise en marche et une mesure du temps communes. Pour les accélérographes digitaux, un échantillonnage commun peut être nécessaire. Tous les accélérographes présentent la caractéristique d'avoir une échelle de mesure jusqu'à 2,0 g (deux fois l'accélération de la pesanteur).

**Tableau 1**  
**Types et caractéristiques des accélérographes**

<i>Types</i>	<i>Caractéristiques communes</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Film analogique</li> <li>• Type magnétique analogique FM</li> <li>• Bande digitale</li> <li>• Mémoire digitale du type compact</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déclencheur ou démarreur réglable</li> <li>• Trois accéléromètres montés orthogonalement</li> <li>• Format d'enregistrement de séries de temps</li> <li>• Dispositif de mesure du temps</li> <li>• Alimentation en énergie sans coupure</li> <li>• Boîte de protection pour mettre l'appareil à l'abri des éléments nuisibles</li> </ul>

Pour chacun des quatre types, il y a généralement des choix de modifications et/ou des caractéristiques optionnelles : par exemple, batterie de fourniture d'énergie interne ou externe, temps réel, enregistrement centralisé et capteurs avec télémessure, types de trou de forage, etc.

Les récents progrès en électronique ont rendu définitivement obsolètes les enregistreurs à film analogique et à bande digitale : néanmoins, un certain nombre

equipment manufacturers and the earthquake engineering profession recognised the need for more and improved strong motion records. Since several dams experienced severe shaking during earthquakes, a number of dam owners also had vital interests in the improvement of such instruments.

A diversity of strong motion instrumentation now exists. When selecting the type of instrument(s) to be used at any dam, owners and their engineers should be aware of the basic characteristics, features, applications, and cost-effectiveness of each type.

Accelerographs, which record the acceleration-time history of ground shaking at a site, are the basic strong motion instruments in use. Developments in the past 20 years have resulted in improved recording capability ranging from the old analog film recorders to a wide variety of solid state digital instruments.

Accelerographs have been categorized into four types based on their recording systems, all of which have six common features as shown in Table 1. In addition, other features which may be considered advisable for instruments sited on dams are: 1) the capability to record absolute time, and 2) the capability for all installed instruments to be interconnected for common start and common timing. For digital accelerographs, common sampling may be necessary. All accelerographs are typically available with a full scale range up to 2.0 g (twice the acceleration of gravity).

**Table 1**

**Types and features of accelerographs**

<i>Types</i>	<i>Common Features</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog film</li> <li>• FM analog magnetic type</li> <li>• Digital tape</li> <li>• Digital solid state memory</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• An adjustable trigger or starter</li> <li>• Three orthogonally-mounted accelerometers</li> <li>• A time series recorder format</li> <li>• A timing system</li> <li>• An uninterruptable power supply</li> <li>• A housing to protect the instrument from exposure to the elements</li> </ul>

With each of the four types, there are usually choices of modifications and/or optional features; for example, internal or external battery supply, real time, centralised recorder and remote sensors, borehole types, etc.

The recent developments in electronics have made analog film and digital tape recorders definitely obsolete : nevertheless a number of them are still currently in

de ces types d'enregistreur sont encore en service. Toutefois, les coûts de traitement des enregistrements, tel que la digitalisation d'un film analogique, peuvent être élevés, en particulier s'il y a de nombreux enregistrements; aussi le remplacement des anciens enregistreurs à film analogique par des dispositifs à mémoire de type compact sera-t-il économique.

Actuellement, un large ensemble d'accélérographes digitaux de type compact sont disponibles sur le marché, les différences portant essentiellement sur la puissance de résolution et la capacité de mémoire. La résolution des enregistreurs digitaux s'exprime généralement en termes de bits, s'étendant de douze à vingt ou vingt-quatre bits, les dernières valeurs caractérisant les récents accélérographes conçus au cours de ces dernières années. La capacité de mémoire va de quelques mégabits pour le type RAM (Random Access Memory, mémoire à accès direct) à 20 ou 40 mégabits pour les appareils équipés de cartes à mémoire flash. Le coût des accélérographes de type compact a beaucoup diminué au cours de ces dernières années, ce coût étant maintenant comparable ou même inférieur à celui des dispositifs analogiques. Le coût des accélérographes digitaux de type compact augmente approximativement avec la puissance de résolution et la capacité de mémoire, et avec les accessoires tels que modems, récepteurs de code de temps GPS, etc.

Dans certains cas, les coûts d'installation font que le prix d'achat des appareils semble relativement faible. Une installation peut se réduire à une simple fixation par boulons sur une paroi interne de l'ouvrage; par contre, la mise en place d'un appareil dans un trou de forage est complexe, conduisant à de nombreux coûts associés. Les coûts de raccordement peuvent être élevés, par exemple aux emplacements où une grande longueur de câbles et de conduits est nécessaire. Les coûts d'exploitation et d'entretien, comprenant les pièces de rechange et la formation des techniciens, varient parfois de façon sensible avec un certain nombre de facteurs propres au site.

Dans les régions de faible sismicité, où très peu de séismes risquent de se produire au cours de la durée de vie du barrage, des appareils simples, à faible capacité de mémoire, peuvent constituer l'installation la moins coûteuse. Dans les zones de forte sismicité, susceptibles de subir de nombreux séismes et répliques, un appareil de coût initial plus élevé, mais de plus grande capacité de mémoire, est parfois préférable.

Tous les accélérographes digitaux modernes permettent aux maîtres d'ouvrage d'avoir très rapidement des enregistrements digitalisés pour des études et calculs, et leur donnent la possibilité d'interroger à distance les accélérographes immédiatement après un séisme.

#### *4.2.1.2. Accélérographes à film analogique*

Bien qu'il ne soit plus fabriqué, le type d'accélérographe pour fortes secousses le plus couramment utilisé sur les barrages dans le monde est celui enregistrant les vibrations du sol sur film photographique. De tels accélérographes analogiques sont généralement des unités standard, autonomes. Ils sont conçus pour détecter et enregistrer de fortes secousses indépendamment, ou peuvent être des systèmes spécifiques au site, interconnectés. De tels systèmes peuvent être constitués, soit

service. However the record processing costs such as digitising of analog film may be considerable, especially if there are many records, so the replacement of the old analog film recorders with solid state memory devices should be considered as cost-effective.

Presently a wide set of solid state digital accelerographs are available on the market, differing mainly in resolution and memory size. Resolution of digital recorders is usually expressed in terms of bits, ranging from twelve to twenty or twenty-four bits, the latest values being typical for the new accelerographs designed in the last few years. The memory size spans from some megabytes of solid RAM up to 20 or 40 Mbytes for the instruments equipped with flash memory cards. The cost of solid state accelerographs is significantly decreased in the last few years, being comparable with or even lower than the one of analog devices. Roughly speaking, the cost of digital solid accelerographs increases with resolution and memory size and with built-in accessory devices such as modems, GPS time code receivers etc.

In some instances, installation costs may make the purchase price of the instruments seem minor. Installation can be as simple as bolting of the accelerograph unit to the inside surface of a structure, or as complex as placement of the unit in a borehole, with a correspondingly wide range of associated costs. Interconnection costs may be considerable; for example at locations where extensive cables and conduits are required. Operation and maintenance costs, which include spare parts and training of technicians, may vary significantly with a number of site specific factors.

In regions of low seismicity where few earthquakes can be expected during the lifetime of the dam, simple, small memory size instruments may be the most cost effective equipment to install. In highly seismic areas where there may be many earthquakes and aftershocks, an instrument with higher initial costs, but higher memory size may be preferable.

All modern digital accelerographs allow owners to have immediate digitised records available for review and analysis, and a system by which they can remotely interrogate accelerographs on a dam immediately after an earthquake.

#### *4.2.1.2. Analog film accelerographs*

Despite they are no longer in production, currently the most common type of strong motion accelerograph in world-wide use on dams is that recording ground motion vibrations on photographic film. Such analog accelerographs usually are standard, off-the-shelf, self-contained units. They are designed to detect and record strong motions independently, or they can be site-specific, interconnected systems. Such systems may consist of either interconnected self-contained accelerographs or

d'accélérographes autonomes interconnectés, soit d'unités à enregistrement central reliées à un accéléromètre de télédétection. Généralement, dans un système interconnecté, un mécanisme de déclenchement principal détecte un mouvement du sol dépassant un seuil de déclenchement prédéterminé, met en marche le mécanisme d'enregistrement de toutes les unités du système et fournit les enregistrements avec une mesure de temps commune.

L'interconnexion des appareils est réalisée au moyen de fil résistant. Si les systèmes autonomes ne sont pas connectés entre eux, mais possèdent des générateurs de code de temps (GCT) internes, ou des récepteurs radio de code de temps, chaque unité peut déclencher à un temps légèrement différent; cependant, chaque enregistrement comportera des signaux de temps identiques et une corrélation précise des enregistrements, et un calcul de la réponse dynamique de l'ouvrage est possible. Des générateurs de code de temps sont adoptés dans de nombreux systèmes.

Les déclencheurs sismiques sont généralement réglés pour démarrer l'enregistrement lorsque le seuil d'accélération du sol de 0,01 g est dépassé; d'autres critères peuvent être adoptés en fonction de la sismicité du site du barrage. Le seuil d'une « forte » accélération horizontale du sol est pris égal à 0,05 g. Un tel mouvement est défini comme la secousse minimale ayant une signification technique. Un déclencheur sismique vertical sera généralement utilisé pour mettre en marche le(s) mécanisme(s) d'enregistrement. De tels déclencheurs sismiques sont communs à tous les types d'accélérographes.

La plupart des accélérographes existants sont situés sur le barrage ou près de l'ouvrage. Un plus petit nombre d'appareils sont installés dans les ouvrages annexes. Quelques barrages ont des capteurs (accéléromètres) en fond de trou, reliés à des enregistreurs situés en surface. Un grand nombre des capteurs précités sont installés dans des trous de forage qui ensuite sont comblés au moyen de gravillon ou de sable grossier, ce qui bloque les appareils en place et permet généralement leur récupération. Des dispositifs de blocage et déblocage en fond de trou sont disponibles depuis peu de temps. Ces appareils qui sont inaccessibles, avec impossibilité de les récupérer, ne peuvent être entretenus et, après plusieurs années, peuvent cesser de fonctionner ou poser des problèmes de fiabilité.

L'évolution des accélérations dans le temps, enregistrée par un accélérographe à film analogique, peut être traitée simplement et rapidement. Seuls une chambre noire et des produits chimiques photographiques sont nécessaires. Cependant, pour des analyses dynamiques avancées, utilisant des programmes de calcul sur ordinateur, l'enregistrement doit être digitalisé. Une telle digitalisation est assez coûteuse, qu'elle soit faite à la main ou automatiquement.

#### *4.2.1.3. Accélérographes avec enregistrement sur bande*

Les dispositifs d'accélérographes avec enregistrement sur bande, du type analogique et du type digital, sont disponibles sous forme d'appareils autonomes, ou avec des unités d'enregistrement central. Les systèmes analogiques sont actionnés par la secousse sismique et, postérieurement, refontionnent automatiquement pour enregistrer les phénomènes consécutifs. Les systèmes digitaux ont un déclencheur digital et des mémoires pré-événement (les systèmes analogiques n'ont pas de

central recording units connected to remote sensing accelerometer. Generally, in an interconnected system, a seismic master trigger senses ground motion exceeding a preset triggering threshold, starts up the recording mechanism of all units in the system, and provides the records with common timing.

Instrument interconnection is typically by hard wire. If self-contained systems are not wired together, but have internal time code generators (TCG's), or radio time code receivers, each unit may trigger at a slightly different time; however, each record will carry identical time signals and precise correlation of the records, and analysis of the total dynamic response of the structure is possible. TGC's are preferred for many systems.

Seismic triggers are usually set to start recording when a ground acceleration threshold of 0.01 g is exceeded; other criteria can be adopted depending upon the seismicity of the dam site. The onset of " strong " horizontal ground acceleration is considered to be 0.05 g. Such motion is defined as the minimum shaking of engineering significance. A vertical seismic trigger will usually be used to start up the recording mechanism(s). Similar seismic triggers are common to all types of accelerographs.

Most existing accelerographs are located either on or adjacent to the dam. A smaller number is within the dam appurtenant structures. Some dams have downhole sensors (accelerometers) connected to recorders on the surface. Many downhole instruments are installed in drill holes backfilled with pea gravel or coarse sand, which both " lock " the instruments in place and generally permit their retrieval. Downhole locking and unlocking devices recently have become available. Equipment that is inaccessible and cannot be retrieved cannot be maintained and, after several years, may cease to operate or be of questionable reliability.

Acceleration time histories recorded by an analog film accelerograph can be processed simply and quickly. Only a darkroom and photographic chemicals are needed. However, for advanced dynamic analysis applications using computer programs, the record must be digitised. Such digitising is a fairly costly process, whether done by hand or automatically.

#### *4.2.1.3. Accelerographs with tape records*

Accelerograph systems utilising tape records, both analog and digital, are available in self-contained packages or with central recording units. The analog systems are actuated by earthquake shaking and, after the event, automatically reset for the recording of subsequent events. The digital systems have a digital trigger and variable pre-event memories (analog systems have no memory prior to triggering) and wider frequency response than their analog counterparts. Interconnected digital

mémoire avant déclenchement), ainsi qu'une réponse en fréquence plus étendue que leurs pendants analogiques. Les accélérographes digitaux interconnectés fournissent un échantillonnage commun et permettent une analyse des très petites différences de phase entre les emplacements. Afin de digitaliser les enregistrements sur bandes, celles-ci sont tout d'abord extraites, puis traitées et corrigées pour tenir compte des diverses influences instrumentales.

#### *4.2.1.4. Accélérographes digitaux du type compact*

Le principal avantage des accélérographes du type compact est la mémoire électronique. Cet avantage résulte de l'absence d'éléments mobiles, tels que déroulement du film et mécanisme d'entraînement de la bande, dans la partie enregistreuse de l'accélérographe. L'élimination de ces éléments mobiles permet de réduire considérablement les défaillances mécaniques et les problèmes associés, et conduit à un appareillage plus fiable. L'enregistrement n'est pas physiquement extrait de l'accélérographe comme dans les types avec film et ruban, mais est transféré de la mémoire de l'appareil in situ à la mémoire RAM d'un ordinateur personnel portable, ou est transmis par téléphone, satellite ou radio à un poste central. D'autres avantages sont, d'une part, le pré-enregistrement permettant de connaître le début du phénomène avant le signal de déclenchement, et, d'autre part, les niveaux bruit/signal beaucoup plus bas, ce qui permet de recueillir des informations utiles correspondant à une plus faible amplitude ou sur une bande de période plus étendue.

Tout accéléromètre dans un réseau donné peut déclencher un enregistrement, ce qui améliore la fiabilité. En outre, si les accélérographes installés sont conçus pour une interrogation à distance, les visites sur le site seront moins nombreuses.

#### *4.2.1.5. Fiabilité des divers types d'appareils pour fortes secousses*

La fiabilité des accélérographes pour fortes secousses dépend beaucoup d'une installation satisfaisante, de bonnes conditions environnementales de fonctionnement et d'un entretien régulier.

Malgré l'introduction relativement récente d'accélérographes digitaux du type compact, la fiabilité de ce type d'appareil peut être convenablement comparée avec celle des types « à film analogique », « à bande analogique », ou « à bande digitale ». Comme déjà mentionné, l'absence de parties mobiles dans les appareils digitaux du type compact améliore la fiabilité, le remplacement d'éléments défaillants étant rendu, en même temps, plus facile et moins coûteux.

Les dispositifs installés en surface ont fonctionné avec succès sur une période relativement longue, dans des conditions variées de climat, de durée de service, et d'entretien. On dispose actuellement suffisamment de personnel compétent pour l'exploitation et l'entretien des appareils. Le nouveau personnel d'entretien peut être convenablement formé pour la plupart des interventions sans qu'il possède des connaissances avancées en électronique. En outre, la longue période d'utilisation et la fabrication relativement élevée d'appareils ont conduit à une fiabilité plus grande pour un coût raisonnable.

accelerographs provide common sampling and result in the ability to analyse fine phase differences between locations. To digitise the taped records, the tapes are first removed from the field, and then processed and corrected for various instrumental effects.

#### *4.2.1.4. Solid state digital accelerographs*

The key advantage of solid accelerographs is that of electronic memory. This advantage results from the lack of moving parts, such as film transports and tape drivers, in the recording part of the accelerograph. By eliminating these moving parts, mechanical failures and related problems are greatly reduced and the instrument is inherently more reliable. The record is not physically removed from the accelerograph as with the film and tape types, but is transferred from the instrument memory in the field to either the solid state RAM memory of a portable personal computer, or transmitted via telephone, satellite, or radio to a central location. Further advantages are pre-event recording, allowing the beginning of the event ahead of the triggering signal to be retrieved, and much lower noise-to-signal levels that allow useful information to be retrieved to lower amplitude or over a wider period-band.

Any accelerometer in a given array can trigger recording, therefore reliability is enhanced. In addition, if the accelerographs at a site are designed for remote interrogation, fewer on-site visits will be necessary.

#### *4.2.1.5. Reliability of different types of strong motion instrumentation*

Reliability of strong motion accelerographs is dependent to a great extent on proper installation, provision of good environmental operating conditions, and regular maintenance.

Despite the relatively recent introduction of solid state digital accelerographs, a fair comparison of the reliability of this type with that of analog film, analog tape, or digital tape is possible. As already noted, the lack of moving parts in solid state digital instruments enhances reliability, making at the same time substitution of faulted parts easier and cheaper.

Surface-mounted systems have had a relatively long history of successful use, under varying conditions of climate, duration of service, and maintenance. There is presently sufficient availability of professionals and technicians skilled in operating and servicing them. New service personnel can be adequately trained for most service requirements without an advanced background in electronics. Moreover, the long history of use and relatively high instrument production has resulted in improved reliability at reasonable cost.

Si l'on compare les dispositifs installés en surface à ceux situés en fond de trou, on constate que les premiers sont plus fiables en raison de leur entretien et de leur remplacement relativement faciles. Les coûts des appareils et de leur installation, dans le cas des accélérographes situés en fond de trou, sont généralement plus élevés que ceux des appareils en surface et, si l'on y ajoute les problèmes de fiabilité, leurs applications doivent être évaluées avec soin.

#### 4.2.1.6. Solutions d'interconnexion des appareils

Les solutions d'interconnexion dont il a été question dans les paragraphes précédents peuvent être très variées et sont indiquées dans le Tableau 2, avec les avantages et inconvénients de chacune (Siegel, 1988).

**Tableau 2**  
**Solutions d'interconnexion des appareils**

##### *Solution 1 - Sans interconnexion*

- Avantages :
- a. Coût plus faible de l'appareillage et de son installation
  - b. Plus petit nombre de déclenchements intempestifs résultant d'interférences électriques
- Inconvénient : Absence de départ commun de mesure du temps

##### *Solution 2 - Mise en marche commune et mesure de temps commune par installation de câbles de liaison*

- Avantages :
- a. Une mise en marche commune améliore la fiabilité du dispositif en disposant des démarreurs redondants, chacun pouvant déclencher tout le dispositif
  - b. Une mesure de temps commune permet à l'utilisateur de synchroniser les enregistrements provenant de chaque appareil
- Inconvénients :
- a. Coût parfois élevé des câbles de liaison
  - b. Plus vulnérable à la foudre
  - c. Susceptible de déclenchement intempestif résultant de faux signaux radio ou électriques captés par les câbles de liaison à moins qu'un algorithme de déclenchement spécial ne soit prévu.

##### *Solution 3 - Sans interconnexion - Les appareils ont des radios*

- Avantages :
- a. Le temps radio fournit une référence en temps réel
  - b. La mesure du temps radio permet à l'utilisateur de synchroniser les enregistrements provenant de chaque appareil

In comparing surface-mounted systems with borehole systems, surface systems have greater reliability due to their relatively convenient maintenance and replacement. Equipment and installation costs for borehole accelerograph systems are usually higher than surface systems and, coupled with reliability concerns, their applications must be more carefully evaluated.

#### 4.2.1.6. Instrument interconnection options

The interconnection options referred to in the previous paragraphs can be quite varied and are tabulated in Table 2, together with the advantages and disadvantages of each (Siegel, 1988).

**Table 2**  
**Instrument interconnection options**

##### *Option 1 - No interconnection*

- Advantage:
- a. Lower cost for hardware and installation
  - b. Fewer false triggering from electrical interference

Disadvantage: No common start of timing

##### *Option 2. - Hardwired common start and common timing*

- Advantage:
- a. Common start improves system reliability by providing redundant starters, anyone of which can trigger the entire system
  - b. Common timing allows user to synchronise records from each instrument

Disadvantage:

- a. Sometimes high cost of running cables
- b. More vulnerable to lightning
- c. Susceptible to false triggering from spurious electrical or radio signals picked up by interconnection wiring unless special trigger algorithm are provided

##### *Option 3 - No interconnection - Instruments have radios*

- Advantage:
- a. Radio time provides a real-time reference
  - b. Radio timing allows user to synchronise records from each instrument

- Inconvénients :
- a. Coût des radios
  - b. Coût des antennes et du montage
  - c. Le site du barrage a parfois des caractéristiques faibles ou variables en matière de signal radio

*Solution 4 - Sans interconnexion - Les appareils sont équipés de GCT (générateurs de code de temps)*

- Avantages :
- a. Le GCT fournit une référence en temps réel
  - b. Le GCT permet à l'utilisateur de synchroniser les enregistrements provenant de chaque appareil

- Inconvénients :
- a. Coût du GCT
  - b. Coût du contrôleur d'affichage du temps
  - c. Dérive du GCT nécessitant des corrections et des interpolations du temps

*Solution 5 - Interconnexion par câbles - Appareils équipés de radio ou de GCT*

- Avantages :
- a. Le GCT ou la radio donne une référence en temps réel à tous les appareils interconnectés
  - b. Le GCT ou la radio permet à l'utilisateur de synchroniser les enregistrements provenant de chaque appareil

- Inconvénients :
- a. Coût du GCT ou de la radio et problèmes associés
  - b. Coût des câbles de liaison
  - c. Vulnérabilité à la foudre

#### **4.2.2. Autres capteurs**

Dans les cas les plus importants, le réseau de capteurs devient plus étendu et comprend la mesure d'autres grandeurs en plus des accélérations.

Ces appareils de mesure complémentaires sont les suivants :

- sismomètres, utilisés pour mesurer, grâce à leur grande sensibilité, l'activité sismique et microsismique de la zone, en vue de définir son degré de sismicité et/ou détecter d'éventuelles failles actives;
- extensomètres noyés dans le béton, en correspondance avec les joints, qui mesurent directement les déformations unitaires de l'ouvrage dues aux forces dynamiques de forte intensité;
- cellules de pression sur le parement amont, pour mesurer les pressions hydrodynamiques.

#### **4.3. STRUCTURE DU DISPOSITIF**

En ce qui concerne la configuration de l'installation, le dispositif d'auscultation peut présenter une structure centralisée ou répartie.

- Disadvantage:
- a. Cost of radios
  - b. Cost of antennas and mounting of same
  - c. Damsite sometimes has weak or variable radio signal strength

*Option 4 - No Interconnection - Instruments have TCG (Time Code Generators)*

- Advantage:
- a. TCG provides a real-time reference
  - b. TCG allows user to synchronise records from each instrument

- Disadvantage:
- a. Cost of TCG
  - b. Cost of Time Display Controller
  - c. TCG will drift and time correction and interpolations are needed

*Option 5 - Hardwired interconnection - Instruments have radio or TCG*

- Advantage:
- a. TCG or radio gives real-time reference to all interconnected instruments
  - b. TCG or radio allows user to synchronise records from each instrument

- Disadvantage:
- a. Cost of TCG or radio and related items
  - b. Cost of running cables
  - c. Vulnerability to lightning

#### **4.2.2. Other transducers**

In cases of major importance, the transducer network becomes wider and includes monitoring of quantities other than accelerations.

The following are mentioned :

- seismometers, used for monitoring, thanks to their high sensitivity, the seismic and microseismic activity of the area, in order to define its degree of seismicity and/or detect possible unknown active faults;
- strain gauges, embedded in concrete in correspondence of the joints, which directly measure the strains of the structure due to dynamic forces of large intensity;
- pressure cells on the upstream face, used to measure hydrodynamic pressures.

#### **4.3. SYSTEM ARCHITECTURE**

Generally, from an installation point of view, monitoring system, can have a centralised or distributed architecture.

Dans un système centralisé, tous les canaux d'enregistrement sont directement reliés à une unité centrale, où toutes les opérations de conditionnement et d'acquisition sont effectuées.

Dans un système réparti, par contre, des groupes de capteurs sont reliés à des unités de mesure périphériques, ayant des fonctions de conditionnement, d'acquisition et, parfois, de stockage temporaire des données, avant leur transmission digitale à l'unité centrale. En particulier, lorsque le réseau de capteurs est important et étendu, la structure répartie présente de nombreux avantages :

- amélioration de la précision des mesures. Étant donné que l'unité périphérique est installée à proximité des capteurs associés, la longueur des câbles est plus courte, ce qui conduit à une diminution des parasites d'origine électrique;

- réduction notable des coûts, car les câbles de liaison sont assez coûteux;

- augmentation de la fiabilité, étant donné qu'en cas de défaillance d'une des unités seule une partie du système est mise hors service.

Dans le cas de systèmes centralisés, ceux-ci sont équipés d'une unité centrale d'acquisition des données, souvent reliée à une unité de contrôle général et de traitement des données.

### **Unité d'acquisition des données**

L'unité d'acquisition des données pourra recevoir des signaux statiques et dynamiques; étant donné que pour l'acquisition des grandeurs dynamiques les performances demandées au système d'acquisition en termes de largeur de bande, de défaut d'alignement canal à canal et de logique de déclenchement peuvent devenir critiques, une grande attention devra être portée à cette question.

La largeur de bande des fréquences du système (gamme d'échantillonnage pour les systèmes digitaux) nécessaire pour une description correcte du phénomène étudié, sans perte d'informations, doit être plus grande que le domaine des fréquences du phénomène; par exemple, dans le cas de l'enregistrement digital d'un séisme, une gamme d'échantillonnage de 100 ou 200 Hz est suggérée. En outre, il importe que le déphasage entre les différents canaux soit négligeable, car le traitement critique – par exemple, la détermination des formes modales naturelles – est fortement affecté par un tel déphasage. Toutefois, une grande largeur de bande, lorsque le phénomène dure longtemps et que le nombre de canaux est élevé, peut poser des problèmes de mémoire, en particulier lorsque le changement d'unité de stockage (bande ou disquette) est difficile à réaliser, comme dans le cas de systèmes situés dans des sites d'accès difficile.

En outre, du fait de la manifestation imprévisible des séismes, etc., il est nécessaire que le système soit constamment prêt pour l'acquisition (il ne fonctionne pas à des intervalles de temps prédéterminés) et soit capable – au moyen d'un dispositif de déclenchement « intelligent » – de reconnaître l'apparition du phénomène à enregistrer, en évitant en même temps l'acquisition de faux signaux (bruits, perturbations causées par l'homme, etc.). De plus, afin de ne pas perdre les

In a centralised system all the recording channels are directly connected to a single unit, where all the conditioning and acquisition tasks are performed.

In a distributed system, on the contrary, groups of transducers are connected to peripheral measuring units, performing conditioning, acquisition, and – sometimes – temporary data storage functions, prior to their digital transmission to the central unit. Especially when the transducer network is large and widespread, distributed hardware architecture may prove to have many advantages :

- improvement of the measure precision. Since the peripheral unit is obviously installed close to its relevant transducers, the cable length is shorter, which results in a reduction of the electric noise;
- remarkable reduction of costs, since the connecting cables are rather expensive;
- higher reliability, since in case of failure of one of the units, only a part of the system will be out of work.

In case of centralised systems, these are provided with a central Data Acquisition Unit, often connected to a Supervisory and Data Processing Unit.

### **Data Acquisition Unit**

The Data Acquisition Unit should be capable of acquiring both static and dynamic signals, taking into account that for the acquisition of dynamic quantities, the performances required to the acquisition system in terms of bandwidth, channel-to-channel skew and trigger logic may become critical, therefore attention should be paid to this subject.

The system frequency bandwidth (sampling rate for digital systems) required for a correct description of the phenomenon under study, without missing information, has to be higher than the frequency content of the phenomenon itself: for example, in case of digital recording of an earthquake, a sampling rate of 100 or 200 Hz is suggested. Moreover, it is of remarkable importance that the phase lag among the different channels be negligible, since critical processing – e.g. the determination of the natural mode shapes – is strongly affected by this. A large bandwidth, however, when the duration of the phenomenon is long and the number of channels is high, may cause memory problems, especially when the change of the storage unit (tape or disc) is not easy to be done as is the case of systems operating in sites of difficult access.

Furthermore, due to the unpredictable occurrence of earthquakes, etc., it is necessary that the system be constantly ready for acquisition (it does not operate at pre-established time intervals) and be able – through an “ intelligent ” triggering system – to recognise the occurrence of the event to be recorded, avoiding at the same time the acquisition of spurious signals (noise, human-induced disturbances, etc.). Moreover, not to miss the initial data of the time history, often of basic

données initiales de l'évolution du phénomène dans le temps, souvent d'importance fondamentale dans le cas d'un séisme, le système doit être muni d'une mémoire pré-événement pratique.

### **Unité de contrôle général et de traitement des données**

Les dispositifs d'auscultation sont parfois équipés d'une unité de contrôle général et de traitement des données.

Cette unité contrôle l'ensemble du processus au moyen d'un certain nombre de fonctions : mise en route de l'enregistrement, essais de diagnostic, validation des données et traitement préliminaire, comparaison avec les valeurs des seuils préétablis, production d'alarme, impression de rapports et, plus généralement, interface avec les utilisateurs locaux et/ou éloignés.

Les dimensions et les caractéristiques de ce système dépendent de l'étendue du réseau de capteurs et du niveau de traitement requis par les applications spécifiques. Le traitement en temps réel d'un grand réseau de capteurs dynamiques peut nécessiter des ordinateurs puissants et des logiciels complexes.

importance in case of an earthquake, the system has to be provided with a convenient and settable pre-event memory.

### **Supervisory and data processing unit**

In some cases, monitoring systems are provided with a supervisory and data processing unit.

This unit controls the whole process, since it performs a set of functions such as: start of recording, diagnostic tests, data validation and preliminary processing, comparison with pre-established threshold values, alarm generation, printing of reports and, more generally, interface with local and/or remote users.

Size and characteristics of this system depend on the extent of the transducer network and on the level of processing required by the specific applications. Real-time processing of large arrays of dynamic sensors can require powerful computers and complex software to be performed.

---

## 5. INSTALLATION, EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES DISPOSITIFS DE MESURE

---

Un emplacement et une installation corrects des appareils pour fortes secousses seront bénéfiques en matière de qualité et d'utilité des enregistrements obtenus. Un entretien fréquent donnera l'assurance d'un bon fonctionnement des appareils lors d'un séisme. Diverses considérations sur la préparation du site, l'installation et l'entretien sont présentées dans les sous-chapitres ci-dessous.

### 5.1. INSTALLATION

Si des études analytiques ne sont pas disponibles, un programme minimal d'auscultation comprendra, de façon empirique, l'installation d'un ou plusieurs appareils de mesure en crête et d'un ou plusieurs appareils au pied aval, le long ou près de la section maximale où les déformations et/ou les contraintes maximales sont prévues. Lorsque ces emplacements ont été définis, on doit considérer les contraintes secondaires, telles que accessibilité, circulation, drainage, fourniture d'énergie, vibrations de fond, etc. Les versants instables et les zones avec risques d'éboulements rocheux susceptibles d'endommager le matériel ou son enceinte de protection seront évités. Les appareils ne seront pas installés à des endroits où des vibrations, telles que celles causées par des ouvrages d'évacuation, vannes et ascenseurs, peuvent provoquer un déclenchement intempestif des enregistreurs ou des bruits de fond indésirables au cours de l'enregistrement. Si des appareils doivent être mis en place sur les versants du barrage, ils seront installés en profondeur et des murs de soutènement construits selon les nécessités. Ces murs de soutènement devront être bien séparés des socles des appareils.

#### 5.1.1. Fixation à la fondation et à l'ouvrage

Les unités autonomes, ou les accéléromètres avec enregistrement centralisé, doivent être solidement ancrés à l'ouvrage, à la fondation ou au terrain naturel. Sur les barrages, en béton, cela est réalisé généralement en boulonnant directement l'appareil sur l'ouvrage, qu'il soit placé en crête, dans une galerie, une niche, ou une chambre à l'intérieur du barrage. Les appareils peuvent être fixés par boulons sur des supports en béton compte tenu des problèmes de mise à sec. Sur les barrages en terre et sur le terrain naturel, un socle en béton est habituellement construit pour supporter l'appareil. Afin d'assurer une bonne liaison avec la fondation, le socle peut être muni de pieux courts se prolongeant dans le sol. L'idéal est de réaliser un seul bétonnage pour les pieux et le socle, l'armature se prolongeant du socle dans les pieux. L'appareil est alors boulonné sur le socle, de préférence sur une partie centrale surélevée qui assure une mise à sec. Les socles sont généralement conçus pour permettre l'installation d'une enceinte de protection pour l'appareil. Les socles seront dimensionnés afin que leur fréquence naturelle soit plus élevée que la fréquence des accéléromètres ou de la forte secousse dans le champ proche, les enregistrements des accélérations par les appareils n'étant pas ainsi affectés.

---

## 5. INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE CONSIDERATIONS

---

Proper location and installation of strong motion instruments will pay dividends in both the quality and usefulness of any records obtained. Frequent maintenance will provide assurance that the instruments will be operational in the event of an earthquake. Several site preparation, installation, and maintenance considerations are discussed in the following subsections.

### 5.1. INSTALLATION

If mathematical performance analyses are not available, a rule-of-thumb for a minimal instrumentation program is to deploy one or more instruments at the crest and one or more at the downstream toe, along or near the maximum section of the dam where maximum deformations and/or stresses are expected. Once these general locations have been decided, secondary constraints, such as accessibility, traffic, drainage, power, background vibrations, etc. have to be considered. Unstable slopes and locations where rockfalls could damage the equipment or its enclosure should be avoided. The instruments should not be in locations where vibrations, such as those from outlet works, gates, valves, and elevators could cause spurious triggering of the recorders or undesirable background noise during recording. If instruments are to be located on dam slopes, they should be recessed into the slope, and retaining walls constructed as required. Retaining walls should be well separated from instrument pads.

#### 5.1.1. Foundation and structure attachment

Self-contained units, or accelerometers with central recording units, must be securely anchored to the structure and foundation or natural ground on which they are placed. On concrete dams, this is usually done by bolting the instrument directly to the structure, whether it be at the crest, or in a gallery, alcove, or chamber within the dam. Instruments may be bolted to low concrete pedestals because of drainage considerations. On earth dams and on natural ground, a concrete pad is usually constructed to support the instrument. To assure close coupling with its foundation, the pad may have short piers extending into the ground. Ideally, there will be a single concrete placement for the piers and the pad, and reinforcement will extend from the pad into the piers. The instrument is then bolted to the pad, preferably on a raised central portion which assures drainage. The pads are usually built to accommodate a protective enclosure for the instrument. Pads should be sized so that their natural frequency is higher than the frequency of the accelerometers or the near field strong motion, and thus will not affect the instrumental acceleration records.

Les appareils pour fortes secousses situés dans les ouvrages annexes ne seront pas fixés sur des rebords ou d'autres parties de l'ouvrage qui peuvent avoir un mode de vibration différent de celui de la structure principale dont la réponse doit être enregistrée. Si de tels ouvrages annexes sont suffisamment importants pour être auscultés, l'appareil sera directement fixé à un élément principal de la structure.

### **5.1.2. Orientation**

Les appareils ayant des accéléromètres triaxiaux seront orientés afin que les deux accéléromètres horizontaux soient respectivement parallèle et transversal à l'axe du barrage. Le troisième accéléromètre sera vertical. Dans le cas de barrages-voûtes, un accéléromètre horizontal sera tangent à l'axe et un autre transversal à celui-ci. Les déclencheurs sismiques peuvent être disposés suivant une orientation horizontale ou verticale. Cependant, l'orientation de tels déclencheurs pour appareils pour fortes secousses est verticale, de façon que la première onde à parvenir sur le site, à savoir l'onde de compression ou onde P, soit facilement détectée et les enregistrements opérés avant l'arrivée des ondes de cisaillement ou ondes S.

### **5.1.3. Enceinte de protection**

Une enceinte devra fournir une protection satisfaisante contre les effets climatiques et les actes mineurs de vandalisme, en assurant un espace adéquat pour le matériel et son entretien. Une enceinte légère et relativement basse permettra d'assurer que l'enregistrement n'est pas affecté par les mouvements de l'enceinte. Les abris ne seront pas constitués d'éléments préfabriqués mal ajustés pouvant s'entrechoquer au cours d'un séisme et altérer les enregistrements, et les portes ne devront pas vibrer.

L'enceinte comportera des événements pour la circulation d'air et le refroidissement ; des grillages et filtres placés au-dessus de ces événements assureront une protection contre les insectes et la poussière. Les événements peuvent être situés à un niveau bas sur un côté de l'enceinte et à un niveau élevé sur l'autre côté. En plaçant l'événement bas face au sud, ou sur le côté le plus ensoleillé, on peut réduire les infiltrations d'eau à travers l'événement en cas de longues expositions aux intempéries, ou en cas de forte accumulation de neige puisque celle-ci s'accumulera sur le côté nord ou à l'ombre. L'installation d'une isolation interne autour de l'enceinte peut être nécessaire aux altitudes élevées ou aux latitudes septentrionales.

Un socle de quelques pouces de hauteur et légèrement plus petit que les dimensions internes de l'enceinte assurera une base sèche à l'appareil pour fortes secousses et à la batterie d'alimentation en énergie. Diverses dimensions ont été adoptées pour de tels socles sur différents sites ; certains sont plus hauts avec une surface supérieure plus petite pour l'appareil, mais avec plus de place pour faciliter les interventions à l'intérieur de l'enceinte.

### **5.1.4. Drainage et humidité**

Suivant que l'emplacement des appareils est interne ou externe, un drainage et une aération convenables sont nécessaires pour éviter l'eau de percolation et

Strong motion response instruments in appurtenant structures should not be fixed to shelves or other parts of the structure that may have a vibration mode different than that of the main structure whose response is to be recorded. If such appurtenant structures are important enough to be instrumented, the instrument should be directly attached to a main structural member.

### **5.1.2. Orientation**

Those instruments having triaxial accelerometers should be oriented so that the two horizontal accelerometers are respectively parallel with, and transverse to, the dam axis. The third accelerometer should be vertical. In the case of arch dams, one horizontal accelerometer would be tangent to the axis, and another transverse to that. Seismic triggers may be ordered with either horizontal or vertical orientation. However, the normal orientation of such triggers for strong motion instruments is vertical, so that the first wave to arrive at a site, namely the compression or P-wave, will be easily sensed and the records activated before shear or S-waves arrive.

### **5.1.3. Enclosure**

An acceptable enclosure should provide protection against weather and minor vandalism, and have adequate space for the equipment and its maintenance. A lightweight and low profile enclosure will help to insure that the record is not affected by the motions of the enclosure. Shelters should not be made of loose-fitting precast units which can pound together during an earthquake and distort the recorded data and doors must not vibrate.

The enclosure should be vented for air circulation and cooling, and have screens and filters over the vents for protection against insects and dust. The vents may be placed low on one side and high on the other side of the enclosure. Placing the low vent facing south, or to the sunnier exposure, may reduce water seepage through the vent in case of high exposure, may reduce water seepage through the vent in case of high snowpacks, since snow will build up on the north or shaded sides. Placing heavy insulation around the interior of the enclosure may be necessary at high elevations or northerly latitudes.

A pedestal a few inches high and slightly smaller than the interior dimensions of the enclosure should assure a dry base for the strong motion instrument and battery. A variety of dimensions for such pedestals have been used at different sites; some are higher with a smaller top surface for the instrument, but with more room for working convenience within the enclosure.

### **5.1.4. Drainage and humidity**

Whether the instrument location is interior or exterior, appropriate drainage and ventilation are necessary to avoid seepage water and to minimise condensation.

réduire la condensation. De simples dispositifs de drainage, tels que des rigoles peu profondes ou des puits absorbants pour évacuer l'eau hors du site des appareils, sont des mesures courantes pour les installations en surface. Les socles en béton sont généralement construits avec leur surface supérieure située légèrement au-dessus du sol. Dans des chambres intérieures ou des galeries, les appareils seront éloignés du radier, de préférence sur des socles relativement bas ou dans des niches au-dessus du niveau du radier.

### **5.1.5. Température**

Une bonne aération de l'enceinte sera assurée au cours des périodes de forte température, tandis que des enceintes étanches à l'air, bien isolées, peuvent être nécessaires lorsque les températures descendent nettement au-dessous du point de congélation. Sur certains emplacements, les enceintes sont chauffées par des radiateurs électriques qui permettent également de maintenir sèche la zone des appareils. Il y a de nombreux sites présentant des valeurs extrêmes de chaud et de froid; dans ces zones, les enceintes peuvent être ajustées à ces températures extrêmes au cours des visites courantes d'entretien (ouverture ou fermeture des événements, réglage de l'isolation).

### **5.1.6. Alimentation en énergie**

Les appareils pour fortes secousses sont généralement alimentés en énergie par batterie. Pour un fonctionnement fiable des appareils, les batteries seront équipées d'un chargeur par filtrage relié soit à une ligne électrique soit à des panneaux solaires. La présence ou l'absence d'une alimentation en énergie facilement accessible peut influencer sur l'emplacement des appareils de mesure. Si une ligne électrique n'est pas disponible et que des panneaux solaires doivent être adoptés, l'appareil sera installé dans une zone où il y a un bon ensoleillement et un faible risque de vandalisme.

### **5.1.7. Problèmes d'interconnexion**

Les liaisons par câbles peuvent poser des problèmes particuliers. Si les câbles ne sont pas placés dans des conduits, des rongeurs peuvent les endommager. La foudre provoque des surtensions pouvant causer des dégâts aux capteurs (accéléromètres) et aux enregistreurs.

Les appareils situés dans des trous de forage semblent être prédisposés à des dégâts sous l'effet de la foudre; si les dispositifs de protection à usage multiple sont coûteux, ils peuvent, par contre, prévenir les dégâts ou réduire les coûts de remplacement tout en maintenant les appareils opérationnels. Les câbles seront installés dans des canalisations souterraines ou seront blindés afin de les protéger vis-à-vis de troubles en surface (circulation, animaux, vandalisme).

## **5.2. EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES ACCÉLÉROGRAPHES**

### **5.2.1. Exploitation des appareils analogiques**

Lorsque le déclencheur capte une accélération sismique initiale du sol dépassant un seuil prédéterminé (valeur qui peut être ajustée), l'enregistreur est mis

Simple drainage precautions, such as shallow ditches or French drains to channel water away from the instrument site, are common measures in surface installations. Concrete pads are usually constructed with their top surface slightly above ground. In interior chambers or galleries, instruments should be off the floor, preferably on low pedestals or in above-floor-level alcoves.

#### **5.1.5. Temperature**

Good ventilation of the enclosure should be assured during hot weather, while airtight, well-insulated enclosures may be needed where temperatures drop well below freezing. In some locations, enclosures are warmed by electric heaters, which also help to keep the equipment area dry. There are many sites where extremes of both heat and cold are common; enclosures in these areas can be physically adjusted for the temperature extremes during routine maintenance visits (opening or closing vents, adding or removing insulation).

#### **5.1.6. Power**

Strong motion instruments are usually battery powered. For reliable equipment operation, the batteries must be sustained by a trickle charge connected either to a power line source or to solar panels. Access to, or lack of, a convenient power supply may influence the siting of instruments. If line power is not available and solar panels must be used, the instrument may have to be located where there is good sunlight exposure and minimal risk for vandals.

#### **5.1.7. Interconnection problems**

Hard-wire interconnections have special problems. If not placed in conduit, rodents may cause damage. Lightning causes power surges which may damage sensors (accelerometers) and recorders.

Borehole units seem to be prone to lightning damage, and, while quality, multiple-use protection systems are expensive, they can prevent damage or minimise replacement costs while keeping instruments functional. In order to prevent damage from ground traffic, animals, and vandalism, cables should ideally be either in underground conduits or armoured.

### **5.2. OPERATION AND MAINTENANCE OF ACCELEROGRAPHS**

#### **5.2.1. Operation of the analog instrument**

When the starter senses an initial earthquake ground acceleration in excess of a pre-established threshold (a value which is adjustable and can be preset), the

en route et devient totalement opérationnel en moins de 100 millisecondes. Un mouvement vertical ou horizontal peut démarrer l'enregistreur, suivant le type de déclencheur utilisé. L'enregistreur continue de fonctionner tant que le niveau de déclenchement est dépassé, plus un certain temps (généralement 10 mais parfois 20 secondes ou plus) permettant de mettre au magasin la portion exposée du film. L'enregistrement sur film est généralement enlevé après chaque marche de l'appareil, mais on peut obtenir sur une seule bobine de film jusqu'à 25 minutes d'enregistrement de séisme et de répliques.

Des essais d'inclinaison sont habituellement effectués par le fabricant avant la fourniture de l'appareil. Ces essais déterminent la sensibilité de l'appareil, en se basant sur la flèche de la trace du sismographe, lors de la rotation des accéléromètres dans le champ de gravité de la terre, dans une direction, puis dans l'autre, permettant à la masse de l'accéléromètre de s'immobiliser à chaque mesure. La mesure de l'angle de rotation permet d'obtenir toute valeur d'accélération verticale ou horizontale jusqu'à une variation de 1,0 g. La flèche d'équilibre à 1,0 g est la sensibilité. L'inclinaison de l'accéléromètre par incréments donnera des mesures vérifiant la linéarité. Les essais de sensibilité seront généralement exécutés par le fabricant dans des conditions de laboratoire.

Des essais d'étalonnage pour la fréquence propre et l'amortissement seront facilement exécutés par un technicien du site. Des séries d'étalonnage sont généralement enregistrées au cours de chaque visite d'entretien, de sorte que, si l'appareil n'est pas sismiquement déclenché, 6 à 8 étalonnages peuvent être enregistrés sur chaque bobine de film. Les mesures obtenues par ces enregistrements servent à calculer la fréquence propre et l'amortissement. Les enregistrements seront aussi analysés pour l'intensité d'éclairage, la qualité des repères de temps et la position des traces sur le film.

Deux traces de temps sont généralement enregistrées en même temps que les mouvements sismiques du sol. La première trace est un temps relatif et consiste en une émission d'onde produite intérieurement, qui est utilisée pour établir l'évolution de l'enregistrement dans le temps. La seconde trace peut être une autre émission d'onde, un code de temps binaire contrôlé par un oscillateur précis (tel qu'un GCT) et établi suivant une horloge extérieure, ou un code de temps par signal radio.

Cette indication de temps réel est nécessaire afin que chaque mouvement de déclenchement de l'appareil puisse être nettement identifié quant à la date et à l'heure de son apparition et être corrélé avec les phénomènes enregistrés sur d'autres appareils.

### **5.2.2. Entretien des appareils analogiques**

Les programmes d'entretien établis par les maîtres d'ouvrage et exploitants et concernant les réseaux d'appareils pour fortes secousses comprennent généralement des visites semestrielles par des techniciens d'entretien. Pour les barrages comportant des réseaux étendus d'appareils, les visites peuvent être trimestrielles. En règle générale, le technicien d'entretien vérifie les conditions du milieu environnant, de l'enceinte, le cas échéant, et les conditions de fonctionnement de l'appareil.

recorder is actuated and becomes fully operating in less than 100 milliseconds. Either vertical or horizontal motion can start the recorder, depending on the type of trigger used. The recorder continues to operate as long as the starter detects that the trigger level is exceeded, plus some additional time (usually 10 but sometimes 20 seconds or more) to allow the exposed portion of the film to magazine. The film record is usually removed after each start of the instrument, but, if necessary or desired, up to 25 minutes of earthquake and aftershock records can be obtained on a single roll of film.

Tilt tests are usually performed by the manufacturer before the instrument is delivered. Tilt tests determine instrument sensitivity, based on the deflection of the seismograph trace, when rotating accelerometers through the earth's gravity field, first in one direction, then in the other, allowing the accelerometer mass to come to rest at each measurement. By measuring the angle of rotation, any value of vertical or horizontal acceleration, up to a 1.0 g change, can be obtained. The equilibrium deflection at 1.0 g is the sensitivity. Incrementally tilting the accelerometer will produce measurements that will check linearity. Sensitivity tests are generally performed by the manufacturer under laboratory conditions.

Calibration tests for damping and natural frequency are easily performed by a field technician. Calibration sequences are generally recorded during each maintenance visit, so that if the instrument is not seismically triggered, 6 to 8 calibration records may be performed on each roll of film. Measurements made from these records are then used to calculate natural frequency and damping. The records should also be evaluated for light intensity, quality of timing markers, and the position of the traces on the film.

Two timing traces are usually recorded simultaneously with the earthquake ground motions. The first trace is relative time and consists of a square wave pulse produced internally which is used to establish the time-history of the record. The second trace may be another square wave pulse, a binary time code controlled by an accurate oscillator (such as a TCG) and set according to an external clock, or a radio signal time code.

This real timing is necessary so that each instrument-triggering motion can be clearly identified with respect to the time and date of its occurrence and can be correlated with events on other instrument records.

### **5.2.2. Maintenance of the analog instrument**

Typical maintenance schedules by owners and operators of major strong motion instrument networks and programs at dams call for semi-annual visits by maintenance technicians. Dams with extensive instrument arrays may be on a quarterly schedule. Typically, a maintenance technician checks the overall condition of the surrounding area, the enclosure, if any, and the condition of the instrument.

À moins que des visites de service soient effectuées à intervalles très rapprochés ou qu'une visite spéciale soit faite peu de temps après la précédente visite, des essais de marche seront exécutés et le film remplacé au cours de toutes les visites d'entretien.

Si l'appareil a été déclenché, comme un dispositif d'affichage l'indique, le magasin du film est enlevé pour traitement. Chaque fois qu'une nouvelle bobine de film est mise en place (ou une ancienne bobine enlevée), l'appareil est réétalonné. La source d'énergie est contrôlée et les batteries remplacées s'il le faut. Aux emplacements où des panneaux solaires sont utilisés, ceux-ci seront nettoyés pour enlever la poussière et autres impuretés accumulées.

### **5.2.3. Exploitation des appareils digitaux**

Comme les appareils analogiques pour fortes secousses, les appareils digitaux contiennent des accéléromètres qui auscultent continuellement les mouvements du sol. À la différence des appareils analogiques, le dispositif digital retient en mémoire un intervalle de temps choisi de mouvement du sol qui se produit avant un phénomène sismique déclenchant l'enregistrement. Lorsqu'une vibration sismique dépassant certains critères de déclenchement préétablis se manifeste, les capteurs mettent en fonctionnement l'enregistrement et les signaux sont enregistrés, ainsi que la partie correspondant au prédéclenchement, dans un composant RAM de l'appareil digital. Des microprocesseurs à l'intérieur du dispositif contrôlent les fonctions d'acquisition, de stockage et de sortie. Au cours du processus d'acquisition, les signaux analogiques sont transformés en signaux digitaux.

Un appareil digital est en général du type autonome et peut être exploité suivant une configuration de trois ou quatre canaux. Cependant, plusieurs appareils peuvent être interconnectés pour des applications multi-canaux. Par exemple, des générateurs de code de temps très précis ou des récepteurs radio peuvent être souhaités pour une précision plus grande que celle des horloges classiques, et fourniront une indication de temps commune aux unités interconnectées. Un déclenchement commun et un échantillonnage synchrone sont d'autres applications.

L'exploitation des appareils digitaux pour fortes secousses porte principalement sur le mode d'acquisition dans l'attente d'un phénomène pour déclencher l'enregistrement. Une petite mais très importante partie du temps d'acquisition correspond au déclenchement de l'appareil, la mémoire avant phénomène et les signaux sismiques numérisés étant stockés dans la mémoire de l'appareil.

La récupération des données enregistrées in situ et concernant les fortes secousses, pour la surveillance ou des calculs, peut être effectuée suivant divers procédés. En général, un ordinateur personnel portable, avec un logiciel approprié, est utilisé pour recueillir les données enregistrées par les appareils installés sur le site. Des dispositifs « playback » spéciaux, utilisant des émetteurs radio ou des lignes téléphoniques, destinés totalement ou partiellement à la collecte des données sur les fortes secousses, peuvent être également utilisés; toutefois, leurs coûts sont, en général, nettement plus élevés que celui du dispositif portable précité.

Unless servicing visits are at very frequent interval, or a special visit is being made soon after the previous servicing, test runs should be performed and the film replaced during all service visits.

If the instrument has been triggered, as a display event counter would indicate, the film magazine is removed for processing. Whenever a new roll of film is installed (or an old roll removed), the instrument is recalibrated. The battery power source is usually checked and batteries replaced as required. At locations where solar panels are in use, they may have to be cleaned of dust and other accumulated dirt.

### **5.2.3. Operation of the digital instrument**

As in analog strong motion instruments, digital instruments contain accelerometers that continuously monitor the ground motion. Unlike analog instruments, the digital system retains in memory a selected time interval of ground motion that occurs prior to a record-triggering seismic event. When earthquake induced vibration occurs, that exceeds some pre-set triggering criteria, the sensors start the recording operation and the signals are recorded, together with the pretriggered portion, in a RAM component of the digital instrument until retrieved. Microprocessors within the instrument system control the acquisition, storage, and output functions. During the acquisition process analog signals are converted to digital.

A typical digital instrument is self-contained and can be operated in a three or four channel configuration. However, several instruments can be interconnected for large multi-channel applications. For instance, highly accurate time code generators or radio receivers may be desired for higher accuracy than typical off-the-shelf clocks, and they will provide common timing to the interconnected units. Common triggering and synchronous sampling are other applications.

Operations of digital strong motion equipment are mostly in the acquisition mode waiting for an event to trigger the recording of data. A small but the most important part of the acquisition time is when the equipment is triggered, and both the pre-event memory and the digitised earthquake signals are stored in the equipment memory.

Retrieval of strong motion field data for inspection or analysis may be accomplished by several options. Typically, a portable personal computer with appropriate software is used to retrieve the data from the fixed field instruments. Specialised playback systems using radio transmitters or telephone lines, fully or partially dedicated to strong motion data retrieval, may also be used; however, their costs are generally significantly higher than using portable retrieval equipment.

#### 5.2.4. Entretien des appareils digitaux

Les appareils digitaux ont une période d'application relativement courte. Aussi, des données sont-elles insuffisantes pour faire des recommandations *absolues* sur les opérations d'entretien. Si aucun phénomène de déclenchement ne s'est produit, une visite annuelle pour entretien courant est conseillée. Si une visite du site est effectuée pour recueillir des données, une opération courante d'entretien sera exécutée en même temps.

L'entretien courant consistera en un contrôle des communications de diagnostic en vue de s'assurer que l'électronique des appareils digitaux fonctionne et que les caractéristiques de fabrication et d'utilisation ont conservé leur validité. Les vérifications physiques porteront sur les conditions d'installation des appareils, le milieu environnant, les batteries principales et les batteries de secours, le réglage de l'horloge et le niveau zéro des capteurs.

Étant donné que le contrôle de diagnostic in situ des appareils digitaux est effectué au moyen d'une connexion à un ordinateur personnel portable, le logement des appareils ne nécessitera d'être ouvert que si le diagnostic indique un dysfonctionnement ou une dérive des installations. Par exemple, les accéléromètres peuvent nécessiter un ajustement, ou les horloges un réglage. Si un générateur de code de temps est situé à l'extérieur, par exemple dans une boîte extérieure, le logement des appareils digitaux peut ne nécessiter aucune ouverture pendant de nombreuses années. Lorsqu'un logement est ouvert, tout dessiccateur à l'intérieur sera remplacé.

#### **5.2.4. Maintenance of the digital instrument**

Digital equipment does not have a relatively long history of application. Thus, data are not available to make *unqualified* recommendations of service periods. If no triggering events have occurred, a routine annual maintenance visit is advised. If a site is visited for data retrieval purposes, then a maintenance routine should be performed at that time.

The routine maintenance should consist of a software diagnostic communications check to assure that the electronics of the digital equipment are functioning and that the factory and user-set parameters have remained valid. Physical checks would include the condition of the housing and local environment, a check on the primary batteries and any backup batteries, the setting of the real-time clock, and the "zero" level of the sensors.

Since the diagnostic field checking of digital equipment is done through a hook-up to a portable personal computer, the housing of the equipment will usually require opening only if the diagnosis indicates a malfunction or "drift" of settings. For instance, the accelerometers may have to be balanced or clocks reset. If a time code generator is located externally, such as in an exterior box, the digital equipment housing may not require opening for years. Whenever a housing is opened, any desiccants within should be replaced.

---

## 6. CRITÈRES DE TRAITEMENT DES DONNÉES

---

### 6.1. INTRODUCTION

La collecte et le classement des données enregistrées, ainsi que leur interprétation, selon un programme et des procédures prédéterminés, constituent l'opération finale du processus de surveillance. Ces activités revêtent une grande importance car le succès de l'ensemble du processus en dépend; il est donc nécessaire de les programmer avec précision. S'il s'agit du dispositif le plus simple, avec seulement un ou deux capteurs, les données brutes sont transmises au bureau du maître d'ouvrage pour traitement.

Cependant, dans les systèmes modernes et plus complexes, la plupart des analyses et calculs sont directement effectués par le sous-système de surveillance. Dans de tels cas, grâce au matériel puissant actuellement disponible, le système peut exécuter les opérations en temps réel suivantes :

- calcul des valeurs maximales des grandeurs mesurées;
- calcul du spectre de réponse de la secousse sismique;
- comparaison des valeurs maximales obtenues avec les valeurs prédéterminées des seuils ; si nécessaire, un signal d'alerte peut être produit;
- présentation des résultats sous forme de tableaux et de graphiques.

Un traitement plus complexe (comme, par exemple, celui nécessaire pour caractériser le comportement dynamique du barrage ou établir un modèle mathématique) est effectué off-line. Dans tous les cas, la disponibilité d'une procédure bien documentée pour la situation critique après-séisme est d'une grande importance. La procédure indiquera les experts et ingénieurs devant intervenir pour la suite du traitement des données et de leur diffusion.

### 6.2. TRAITEMENT ET UTILISATION DES ENREGISTREMENTS DE FORTES SECOUSSES

L'utilisation des enregistrements de secousses sismiques de sollicitation pour un calcul dynamique et autre traitement, ou simplement pour la mise à jour des catalogues, nécessite la possession d'évolutions dans le temps digitalisées, c'est-à-dire d'un ensemble de valeurs du couple accélération/temps en unités techniques.

Lorsque des accélérographes à film analogique sont utilisés, l'étape préliminaire comprend la digitalisation des données, suivie de corrections pour distorsion du film, variations dans la vitesse du film et la réponse de l'appareil, etc., et le filtrage pour éliminer les « bruits » de longue période. Des corrections doivent être également apportées aux accélérogrammes dans le cas d'accélérographes digitaux pour tenir compte de la réponse en fréquence du capteur et éliminer les effets de fond.

---

## 6. DATA PROCESSING CRITERIA

---

### 6.1. FOREWORD

Gathering and organisation of the recorded data and their interpretation according to the prefixed time schedule and procedures are the final step of the surveillance process. These activities are of remarkable importance since the success of the whole process may depend on them, and therefore they need to be accurately programmed. When dealing with the simplest of the systems, with only one or a couple of transducers, the “ rough ” data gathered are sent to the Owner’s offices for the carrying out of the requested processing.

However, in modern and more complex systems, most of the analysis operations are directly performed by the supervision sub-system. In such cases, thanks to the powerful equipment presently available, the system is able to carry out the following real-time operations:

- calculation of the maximum values of the measured quantities;
- calculation of the response spectrum of the seismic motion;
- comparison of the obtained maximum values with preestablished threshold values. If required, an alarm signal can be generated;
- data presentation in form of tables and diagrams.

More complex processing (as, for instance, that required for characterising the dynamic behaviour of the dam or for the setting up of a mathematical model) are performed off-line. In any case, remarkable importance shall be deserved to the availability of a documented procedure for the after-earthquake emergency situation. The procedure shall indicate experts and engineers to be alerted and activated for the subsequent data processing and data diffusion.

### 6.2. PROCESSING AND UTILISATION OF STRONG MOTION RECORDS

The use of the input motion records for dynamic analysis, and further processing, or simply for the updating of the catalogues, requires the availability of digitalized time histories, that is a set of couples of time/acceleration values in technical units.

Clearly, when analog film accelerographs are used, the preliminary step is digitising the data, followed by corrections for film distortion, variable film speed and instrument response, etc. and filtering to remove long period “noise”. Corrections to the original accelerograms are requested in case of digital accelerographs too, to account for the frequency response of the transducer and to eliminate base-line effects.

L'intégration des accélérogrammes corrigés conduit à la connaissance des évolutions, dans le temps, des déplacements et vitesses du sol, à partir desquelles sont déduits les valeurs maximales, les durées et les spectres de réponse.

Les valeurs des spectres de réponse et le temps d'occurrence de chaque réponse spectrale maximale sont déterminés à diverses périodes allant de 0,02 à 15 secondes, et pour diverses valeurs d'amortissement (par exemple, 0, 2, 5, 10 et 20 pour cent de la valeur critique). Les données et les résultats du traitement pour chaque groupe d'accélérogrammes, correspondant à un séisme particulier, sont mis sur fichier sous forme digitale (bande magnétique, CD-ROM, etc.).

Une rapide diffusion des enregistrements de fortes secousses, au sein des communautés scientifiques et techniques, améliorera les applications dans les domaines des projets et des calculs. Une telle diffusion permettra d'améliorer les connaissances sur la nature des ondes sismiques et d'exploiter des données contribuant à l'estimation des secousses sismiques de projet.

### **6.3. TRAITEMENT DES ENREGISTREMENTS DE RÉPONSE DE BARRAGE**

Le niveau le plus simple du traitement de la réponse est – comme pour la secousse sismique de sollicitation – le calcul des valeurs maximales : les procédures de traitement des enregistrements ont déjà été illustrées et nécessitent une phase préliminaire d'acquisition et de correction.

Un traitement plus complexe vise à déterminer les paramètres caractérisant le comportement dynamique du barrage, en vue de valider et d'étalonner les modèles mathématiques de référence; les paramètres les plus utilisés sont : les fréquences naturelles, les formes modales et les coefficients d'amortissement des premiers modes de vibration.

Les techniques « identification de système », actuellement bien établies pour les systèmes linéaires ou pseudo-linéaires, sont utilisées pour ces calculs. En pratique, le barrage étant considéré comme un système dont les réponses enregistrées sont les résultats de sortie et le mouvement à la base la donnée d'entrée, les relations résultat/donnée (fonctions de transfert) sont calculées, à partir desquelles – au moyen d'un traitement supplémentaire – les paramètres modaux sont évalués.

Ces évaluations – spécialement celles concernant les formes modales et encore plus l'amortissement – sont influencées par les non-linéarités de la structure et par les algorithmes de calcul, de même que par les erreurs instrumentales et statistiques.

Il est donc nécessaire que les capteurs répondent pleinement aux exigences de précision, de synchronisation et de réponse en fréquence déjà examinées.

Le processus d'identification devient beaucoup plus simple si une bonne connaissance préalable de l'ouvrage est disponible : cela peut être obtenu au moyen d'essais de vibration forcée, qui fourniront donc un support très important au processus de surveillance, lors du choix des capteurs et également au cours du traitement des données.

Integration of the corrected accelerograms leads to ground velocity and displacement time histories, from which maximum values, duration and response spectra are obtained.

Response spectra values and times of occurrence of each spectral maximum response are produced at different periods, ranging from 0.02 to 15.0 seconds, and for different values of damping (for example 0, 2, 5, 10, and 20 percent of critical). The data and processing results for each set of accelerograms from a particular earthquake are filed in digital form on magnetic tape, CD-ROM, etc.

Prompt dissemination of strong motion records throughout the scientific and engineering communities will enhance their design and analysis applications. From such dissemination, the scientist will be able to develop an improved understanding of the nature of seismic waves, and will be able to develop data that will aid in estimating design ground motions.

### **6.3. PROCESSING OF DAM RESPONSE RECORDS**

The lowest level of the processing of the response is - as for the input motion - the calculation of the maximum values: the procedures for the record processing have been already illustrated, and require a preliminary acquisition and correction phase.

More complex processing aims at determining parameters characterising the dynamic behaviour of the dam, in order to validate and calibrate the reference mathematical models; the most widely used of these parameters are : natural frequencies, modal shapes and damping coefficients of the first vibration modes.

“ System identification ” techniques, presently well established especially for linear – or “quasi -linear” systems, are used for these calculations. In practice, being the dam a system the recorded responses of which are the outputs and the base motion is the input, the output/input relationships (transfer functions) are calculated, from which - through further processing – the modal parameters are estimated.

These estimates – especially those relevant to modal shapes and even more to damping – are influenced by the non-linearities of the structure and by the processing algorithms, as well as by instrumental and statistic errors.

It is therefore necessary that the transducers fully respect the already discussed requirements of precision, synchronisation and frequency response.

The identification process becomes much simpler if a deep preliminary knowledge of the structure is available: this can be attained by means of forced vibration tests, which are - therefore - a very important support to the surveillance process, both during the transducers choice phase and data processing phase.

La connaissance des paramètres modaux permet d'estimer la fiabilité du modèle numérique et des hypothèses théoriques sur lesquelles il est basé.

En fait, il est possible d'analyser :

- la convenance de l'adoption d'un modèle 2 D (c'est l'approche caractéristique pour les vérifications sismiques) ou d'un modèle 3 D le cas échéant;
- la validité des valeurs adoptées pour les modules d'élasticité du béton et de la roche;
- l'adéquation de la simulation de l'interaction barrage-retenu au moyen du concept de la masse ajoutée;
- la nécessité d'introduire dans les calculs une partie de la fondation.

Le processus d'interprétation des données et de simulation sur modèle mathématique est, en général, une opération assez complexe, dépendant fortement des caractéristiques particulières du barrage, de la connaissance des problèmes associés et du degré de sophistication des modèles adoptés. À ce jour, aucune procédure bien établie n'existe sur cette question, et des connaissances spéciales avancées, ainsi qu'une compétence technique éprouvée, sont nécessaires.

Through the knowledge of the modal parameters the reliability of the numerical model and of the theoretical hypothesis on which it is based, can be assessed.

It is in fact possible to analyse:

- the adequacy of the use of a 2D model (this is the typical approach to the seismic verifications) or if a 3D model is requested;
- the correction of the adopted values for elastic moduli of concrete and rock;
  
- the adequacy of the simulation of the dam-reservoir interaction through the added mass concept;
- the need for introducing in the calculation a part of the foundation.

The process of data interpretation and mathematical model simulation is generally a rather complex operation, strongly dependent on the peculiar characteristic of the dam, on the knowledge of the related problems and on the degree of sophistication of the models adopted. Till today, no established procedures exist on this subject, and advanced specialised knowledge is necessary, together with an experienced engineering skill.

---

## 7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

---

Les barrages sont des ouvrages essentiels à la vie, car ils assurent à de nombreuses populations une alimentation en eau, une fourniture d'énergie et une protection contre les crues. Des besoins, tels que la fourniture continue d'eau et d'énergie, suffisent à justifier la surveillance sismique des barrages, ne serait-ce que pour démontrer, au moyen des enregistrements obtenus et de leur analyse, que le maintien en service des ouvrages ne sera pas affecté si un fort séisme se produit.

Cette question mérite toute l'attention des responsables publics et privés, c'est-à-dire des autorités et agences gouvernementales et des maîtres d'ouvrage. Dans les pays ayant une sismicité modérée à intense, il est souhaitable que les obligations des maîtres d'ouvrage en matière de surveillance sismique soient prévues dans les Règlements relatifs à la Sécurité des Barrages.

Les autorités doivent, néanmoins, promouvoir directement certaines mesures concernant l'auscultation sismique. Par exemple, en ce qui concerne l'action des séismes sur les barrages, il faut noter qu'une meilleure connaissance des phénomènes de propagation d'onde sismique améliorera la qualité des paramètres du mouvement du sol de projet. Cependant, les recherches dans le champ libre seront plus productives si des réseaux relativement étendus d'appareils pour fortes secousses sont utilisés pour étudier la propagation des ondes sismiques. Des appareils isolés dans le champ libre, situés assez loin du site du barrage, ne fourniront guère de données de recherche. Les frais d'installation de réseaux étendus dans le champ libre seront probablement supportés par les organismes gouvernementaux, puisque l'atténuation du risque sismique en résultant profitera à l'ensemble du public.

L'extension minimale d'un réseau de surveillance sismique sera évaluée en tenant compte de plusieurs facteurs, tels que zonage sismique, dimensions du barrage et de la retenue, matériaux de fondation, et type de barrage.

Dans le cas de petits barrages situés dans des zones de sismicité modérée et ne présentant donc pas de risque important pour les populations habitant à l'aval, la surveillance peut se limiter à la caractérisation du mouvement sismique de sollicitation en enregistrant seulement les accélérations à la base de la section transversale la plus haute.

Dans le cas de barrages de caractéristiques exceptionnelles ou complexes, situés dans des zones de forte sismicité, un niveau élevé de surveillance est exigé, comprenant des mesures des caractéristiques significatives de la réponse et permettant également de caractériser le comportement dynamique du barrage. Dans ces cas, il est recommandé, d'un point de vue technique, d'exécuter des essais de vibration forcée, à partir desquels une « image » de l'état structural du barrage peut être obtenue et les caractéristiques de comportement (par exemple, les paramètres modaux) déterminées.

Dans le cas de très importants aménagements, comportant des retenues étendues et profondes, l'auscultation de la zone autour de la retenue est

---

## 7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

---

Dams are critical lifeline facilities, since large populations often depend on them for water supply, power operation and flood protection. Requirements such as continued water and power supply are sufficient justification for seismic surveillance of dams, if only to demonstrate, through obtained records and their analysis, that their lifeline capabilities will remain intact in the event of a major earthquake.

This is a subject that deserves attention from public and private responsables, namely from national authorities, state agencies and owners. In countries with moderate to intense seismic activity, obligations of owners on seismic surveillance should desirably be foreseen in Safety Regulations for Dams.

Authorities must, nevertheless, promote directly some measures on seismic monitoring. For instance, in what concerns earthquake action on dams, it must be noted that, as the knowledge of seismic wave propagation phenomena increases, the quality of design ground motion parameters will increase accordingly. However, research in free-field settings will be most productive if relatively large arrays of strong motion instruments are used to study seismic wave propagation. Isolated free-field instruments near widely-separated dam site are hardly productive generators of research data. The funding for large free-field arrays should probably be borne by state and/or national agencies, since the resulting earthquake hazard mitigation benefits accrue to the public as a whole.

The minimum extent of the seismic network shall be evaluated taking into account several factors, such as seismic zoning, dimensions of dam and reservoir, foundation materials and type of dam.

In case of small size dams in moderate seismicity areas, which therefore do not represent a major risk for the inhabitants of the downstream locations, surveillance can be limited to the input motion characterisation, by recording just the accelerations at the base of the highest cross-section.

In case of dams with unusual structural characteristics or presenting features of remarkable complexity in high seismicity areas, a higher level of surveillance is required, which includes measurements of some significant characteristics of the response, allowing also the dynamic characterisation of the dam to be performed. In these cases it is advisable, if possible from a technical point of view, to carry out forced vibration tests, through which a "picture" of the structural state of the dam can be obtained, and the behavioural characteristic (such as, for instance, the modal parameters), to be determined.

In case of very important projects, which originate large and deep reservoirs, the monitoring of the area around the basin is recommended, in order to detect

recommandée, afin de détecter d'éventuelles modifications de la sismicité locale et de contrôler les phénomènes de sismicité induite.

L'interprétation des résultats d'auscultation dynamique, en termes de comportement du barrage et d'évaluation de la sécurité, nécessite que les magnitudes observées soient également prises en compte pour les actions statiques. Le dispositif global de surveillance doit donc être conçu en conséquence. L'observation des changements résultant des séismes et affectant les déplacements, les percolations, les fuites, les sous-pressions, la fissuration, est fondamentale dans l'évaluation de la stabilité du barrage après un séisme. Ces grandeurs doivent être comparées avec les valeurs mesurées avant le séisme, mais leur évolution dans le temps immédiatement après le séisme est encore plus importante.

Au cours de ces dernières années, grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique, les appareils de mesure ont connu un développement remarquable et les anciens accélérographes à film analogique sont maintenant remplacés par des accélérographes digitaux à mémoire de type compact, satisfaisant à toutes les exigences d'une surveillance moderne. Toutefois, la réussite d'une surveillance dépend toujours étroitement d'une installation, d'une exploitation et d'un entretien satisfaisants du dispositif de surveillance : toutes ces opérations doivent donc être exécutées avec beaucoup de soin et d'attention.

Enfin, il faut souligner l'importance d'une gestion très soignée des données recueillies, en ce qui concerne leur traitement et l'organisation d'une base de données. C'est en vérité le seul moyen permettant à l'ensemble de la communauté des experts concernés de tirer profit des résultats de la surveillance, et conduisant à de réels progrès dans la compréhension des phénomènes et dans l'établissement de modèles de calcul plus affinés.

possible modifications of the local seismicity and verify the induced seismicity phenomena.

Interpretation of dynamic monitoring results in terms of dam behaviour and safety evaluation needs that the observed magnitudes are also monitored for static actions. So, the global surveillance system must be designed accordingly. Observing changes due to earthquakes, namely in displacements, seepage, leakage, uplift, cracking, is fundamental in evaluating the stability of the dam after an earthquake occurs. Those quantities must be compared with values measured prior to earthquake, but time dependent changes from immediately after the earthquake are even more important.

In the last few years thanks to the progress in electronics, instrumentation has undergone a very remarkable development, and old type analog film accelerographs are being replaced by solid state memory digital accelerographs, which fulfil all the requests of a modern surveillance concept. Nevertheless, a successful surveillance process is still closely dependent on a correct installation, operation and maintenance of the system: all these activities, therefore, require to be performed with the outmost care and attention.

Finally, it is worth outlining the importance of very careful management of the collected data, in what concerns their processing and data base organisation. This is indeed the only way through which the whole community of the experts in the field may take advantage of the results of the surveillance process, and real progresses can be made in the comprehension of the phenomena and in the setting up of more refined calculation models.



---

## ANNEXES/APPENDICES

---

Annexe 1 - Analyse du comportement  
dynamique des barrages  
au moyen d'essais de  
vibration forcée

Appendix 1 - Analysis of the dynamic  
behaviour of dams by  
means of forced  
vibration tests

Annexe 2 - Exemples

Appendix 2 - Case histories

---

## ANNEXE 1

---

### **ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES BARRAGES AU MOYEN D'ESSAIS DE VIBRATION FORCÉE**

#### **1. RÔLE DE L'EXPÉRIMENTATION**

L'établissement d'un modèle mathématique décrivant d'une manière fiable le comportement sismique d'un barrage est une nécessité fondamentale non seulement pour le projet, mais aussi pour la surveillance sismique. En fait, selon les concepts actuels, les opérations de surveillance, au moyen d'une interprétation correcte des données rassemblées, visent à :

- connaître l'état des contraintes de la structure résultant du séisme;
- évaluer les dégâts éventuels causés par les secousses;
- déterminer la capacité de l'ouvrage à continuer de fonctionner sûrement.

Bien entendu, plus le modèle de référence sera précis et fiable, plus l'interprétation des données recueillies sera efficace.

D'autre part, les modèles numériques actuellement disponibles, bien qu'ils soient techniquement très satisfaisants, doivent être améliorés s'ils sont utilisés pour l'interprétation – définie ci-dessus – des phénomènes sismiques enregistrés; en particulier, ils doivent être « calibrés » afin de tenir compte des propriétés réelles des matériaux (par exemple, module de Young et poids volumique de la roche de fondation et du béton) et de leur faire reproduire le comportement réel du barrage en question.

À cet effet, des essais jouent un rôle fondamental en fournissant des données de référence fiables sur le comportement sismique d'un barrage; cependant, on doit indiquer que le niveau de contrainte induit par des essais de vibration forcée ou ambiante est toujours très bas par rapport à celui induit par un séisme. Il en résulte que les essais ne peuvent rendre compte, de façon convenable, du comportement non linéaire dû, entre autres, aux propriétés élasto-plastiques des matériaux, à l'ouverture des joints radiaux, etc.

L'importance de cette limitation diffère suivant qu'il s'agit de barrages en béton ou en remblai. En ce qui concerne les barrages en béton, leur comportement dynamique global (c'est-à-dire leur réponse sismique et les « charges dynamiques » en résultant) ne dépend pas d'une manière significative de dégâts localisés; aussi est-il courant de se référer (sauf dans le cas de dégâts diffus) à des modèles élasto-linéaires. Des zones locales de contraintes élevées et des zones plastiques éventuelles peuvent être étudiées au moyen d'analyses spéciales portant sur les charges statiques dues à l'eau, aux effets thermiques, etc., en plus des charges dynamiques préalablement déterminées.

Pour ces raisons, dans le cas de barrages en béton, les essais jouent toujours un rôle important pour la validation des modèles analytiques.

---

## APPENDIX 1

---

### **ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF DAMS BY MEANS OF FORCED VIBRATION TESTS**

#### **1. THE ROLE OF EXPERIMENTATION**

The setting up of a mathematical model reliably describing the seismic behaviour of a dam is a basic need not only for the design, but also for the seismic surveillance. In fact, according to the most updated concepts, the surveillance activity is aimed, through a proper interpretation of the data gathered, at :

- evaluating the state of stress, the structure underwent during the earthquake;
- assessing possible damage caused by the quake;
- determining the capability of the structure to continue to operate safely.

As it is clear, the more accurate and reliable the reference model is, the more effective the interpretation of the collected data is.

On the other hand, the presently available numerical models, though fully satisfactory from an engineering point of view, have to be further improved if their use is requested for the interpretation, in the above mentioned terms, of the recorded seismic events; in particular they must be “ calibrated ” to account for the actual material properties (as for example, Young modulus and specific gravity of foundation rock and concrete) in order to make them match the actual behaviour of a given dam.

With regard to this aim testing plays a fundamental role, providing reliable reference data on the seismic behaviour of a dam; however it has to be underlined that the stress level induced by forced or ambient vibration tests is always very low with respect to that induced by an earthquake. It follows that tests cannot adequately account for the non linear behaviour, due, among other causes, to the elasto-plastic characteristics of the materials, to the opening of radial joints, etc.

The importance of this limitation is different if concrete or fill dams are concerned. As to concrete dams, their overall dynamic behaviour (that is their seismic response and the consequent “ dynamic loads ”) does not significantly depend on local damages: therefore it is common practise to refer (except in the case of diffuse damages) to linear-elastic models. Local areas of higher stresses and possible plastic zones can be studied by means of special analysis accounting for the static loads due to the water, thermal effects, etc., in addition to the dynamic loads previously determined.

For these reasons, in case of concrete dams testing still maintains its important role for the validation of the analytical model.

En ce qui concerne les barrages en remblai, leur réponse sismique et par suite leur stabilité globale sont fortement influencées par la non-linéarité : dans ce cas, les résultats expérimentaux peuvent être non significatifs. De plus, les essais de vibration forcée sur des barrages en remblai rencontrent toujours des difficultés pratiques et opérationnelles; pour ces raisons, seul un très petit nombre d'essais ont été exécutés sur des barrages en remblai et leur intérêt est beaucoup plus faible que celui des essais concernant des barrages en béton. Néanmoins, de tels essais permettent un étalonnage des calculs de projet dans le domaine linéaire et fournissent une base empirique de propriétés modales de faible amplitude, en particulier de périodes et de formes modales, avec lesquelles les propriétés modales effectives au cours de mouvements sismiques de grande amplitude peuvent être comparées. Ils fournissent également une référence avec laquelle sont comparées les propriétés de faible amplitude dans les essais post-séisme, ce qui constitue un indicateur de toute dégradation permanente susceptible de résulter de secousses sismiques.

L'analyse expérimentale est essentiellement basée sur la réponse du barrage à une excitation externe et conduit à la détermination des paramètres modaux (fréquences naturelles, formes modales et amortissement).

L'excitation peut être obtenue « *artificiellement* » au moyen de vibrateurs mécaniques; dans ce cas, ses caractéristiques sont connues puisqu'elles sont mesurables et contrôlables (niveaux d'intensité et de fréquence).

Dans d'autres cas, l'excitation est « *naturelle* » et est générée par des vibrations du milieu (par exemple, vibrations résultant de la microsismicité du site ou des activités d'exploitation telles que les évacuations des usines hydroélectriques et des conduites). Dans ce dernier cas, les caractéristiques de l'excitation ne peuvent être déterminées qu'approximativement et, bien entendu, ne peuvent être contrôlées par l'exploitant.

La configuration du réseau de capteurs, la technique d'enregistrement et les critères d'interprétation des données sont fortement affectés par la méthode d'excitation. Si une excitation artificielle est adoptée, le traitement des données permet le calcul direct des fonctions de transfert entre réponse et excitation, contenant toutes les informations relatives aux propriétés du barrage; par contre, si une excitation naturelle est adoptée, la réponse enregistrée est inévitablement influencée par les caractéristiques structurales (résonance ou fréquences naturelles) ainsi que par le niveau de fréquence de l'excitation.

De ce fait, la méthode de la vibration ambiante, qui, à première vue, apparaît très intéressante en raison de sa simplicité, peut être insuffisamment précise. Dans certains cas, cependant, pour des rapports signal/bruit suffisamment grands, elle peut fournir des informations sur des fréquences de quelques premiers modes et sur des formes modales, qui peuvent être très utiles.

## **2. EXÉCUTION DES ESSAIS**

### **2.1. Excitation**

Des forces sinusoïdales sont généralement adoptées dans les essais de vibration forcée; dans ce cas, le dispositif d'excitation le plus simple est le vibreur

As to fill dams, their seismic response and consequently their overall stability are greatly influenced by non-linearity: in this case, the experimental results might be rather meaningless. Moreover, forced vibration testing of fill dams still faces some practical and operational difficulties: for these reasons, only very few tests on fill dams have been carried out, and their interest is much lower than that in tests on concrete dams. Nevertheless, such tests provide important calibration of design analyses in the linear range, and provide an empirical baseline of small-amplitude modal properties, particularly periods and mode shapes, with which to compare effective modal properties during large-amplitude earthquake motions. They also provide a reference with which to compare low-amplitude properties in post earthquake tests, as a pointer to any permanent degradation that may have occurred as a result of the earthquake motions.

The experimental analysis is essentially based on the processing of the dam response to an external excitation and leads to the determination of the modal parameters (natural frequencies, modal shapes and damping values).

The excitation can be obtained “*artificially*” by means of mechanical vibrators: in this case, its characteristics are known since they can be measured and can be controlled as to its intensity and frequency content.

In other cases, the excitation is “*natural*”, that is generated by environmental vibrations (for example those due to the site-microseismicity or to the exploitation of operations such as discharge of power stations and pipes). In the latter case, the characteristics of the excitation can be determined only approximately, and obviously, cannot be controlled by the operator.

The scheme of transducer network, the recording technique and the data interpretation criteria are strongly affected by the excitation method: if an artificial excitation is adopted, the data processing allows the direct calculation of the transfer functions between response and excitation, which contain all the information relevant to the dynamic properties of the dam, while, if natural excitation is adopted, the recorded response is inevitably influenced by both the structural characteristics (resonance in correspondence or the natural frequencies) and the frequency content of the excitation.

Owing to these reasons the ambient vibration survey method, which, at a first glance, appears to be very interesting due to its simplicity, may be of scanty accuracy. In certain cases, however, for sufficiently great signal to noise ratios, it can still provide information on frequencies of first few modes, and some information on mode shapes which can be very useful.

## **2. THE EXECUTION OF THE TESTS**

### **2.1. Excitation**

Sinusoidal forces are usually adopted in forced vibration testing; in this case, the simplest excitation device is the mechanical vibrator, made up of two rotating

mécanique constitué de deux masses tournantes excentrées; un dispositif plus récent, basé sur des appareils hydrauliques réagissant sur une masse d'inertie, est capable de générer toute variation des forces dans le temps. Le champ des forces se situe entre 10 et 100 kN.

Les essais sont généralement exécutés sous le contrôle d'un système digital permettant de faire varier la fréquence d'excitation pas à pas, les pas individuels étant de l'ordre de 0,01 Hz. Étant donné que seuls les premiers modes de vibration contribuent d'une manière significative à la réponse de l'ouvrage, 4 à 6 modes sont généralement déterminés; le domaine des fréquences d'essai peut donc varier entre 1 et 20 Hz en fonction des dimensions du barrage.

Des vibrateurs mécaniques et hydrauliques peuvent être conçus pour agir en parallèle; en contrôlant leur fréquence et le déphasage des forces appliquées, une excitation à points multiples peut être obtenue. Dans ce cas, la position et le nombre des appareils d'excitation sont choisis de façon à augmenter ou réduire la contribution d'un ou plusieurs modes à la réponse globale du barrage, ce qui rend l'analyse modale ultérieure plus simple et plus efficace.

Les meilleurs emplacements sont situés sur l'arc de crête; le plus souvent, on utilise deux appareils d'excitation fixés symétriquement ou/et dissymétriquement par rapport à l'axe central du barrage; le choix des points d'application de la force peut utilement s'appuyer sur les résultats d'un modèle préliminaire aux éléments finis afin d'éviter de placer l'appareil d'excitation près d'un nœud de l'un des modes intéressants.

## **2.2. Mesure de la réponse et analyse des données**

Les grandeurs cinématiques, les déformations unitaires et les pressions hydrodynamiques sont habituellement mesurées.

Les grandeurs cinématiques (vitesses et accélérations) permettent de déterminer les fréquences naturelles et les formes modales; en général, on utilise des sismomètres qui, en raison de leur sensibilité élevée, sont préférables aux accéléromètres pour la mesure des mouvements de faible amplitude.

Un appareil de conception nouvelle, très utile lorsque l'emplacement des capteurs sur le barrage est difficile à déterminer, est l'interféromètre du type laser, permettant de capter à une distance maximale de 200-250 m la composante de la vitesse de vibration dans la direction du rayon laser.

Les emplacements et le nombre de points de mesure sont choisis dans le but de capter les mouvements des appuis et de déterminer, avec le maximum de précision, les fréquences de résonance et les formes modales.

Les appareils actuellement disponibles ne permettent pas de mesurer les très faibles déformations unitaires générées par les essais de vibration forcée; cependant, il est possible d'installer, sur les joints ou fissures, des capteurs de déplacement relatif capables de détecter leur ouverture et glissement.

Les pressions hydrodynamiques sont mesurées au moyen d'hydrophones et de cellules de pression, situés sur le parement amont du barrage à différentes profondeurs le long du profil de clé. Les valeurs des pressions hydrodynamiques varient généralement entre 10 et 500 Pa.

eccentric masses; a more updated equipment, based on hydraulic actuators reacting on an inertial mass, is capable of generating whatever force time-history. The range of force is between 10 and 100 kN.

Tests are usually carried out under the control of a digital system by means of which the exciting frequency is made to vary stepwise, the single steps being of the order of 0.01 Hz. Since only the first vibration modes contribute significantly to the structural response, usually 4 to 6 modes are determined; consequently the test frequency range may vary between 1 and 20 Hz, depending on the dam size.

Both mechanical and hydraulic vibrators can be made to work in parallel : by controlling their frequency and the phase lag of the applied forces, a multipoint excitation can be obtained. In this case, the position and the number of exciters are chosen so as to enhance or reduce the contribution of one or more modes to the global response of the dam, thus making the subsequent modal analysis simpler and more efficient.

The most effective positions are on the crest arch; two exciters are used in most cases, fixed in symmetrical or/and antisymmetrical position as to the dam centre axis; the choice of the force application points can be usefully based on the results of a preliminary F.E. model to avoid to place the exciter close to a node of one of the modes of interest.

## **2.2. Response measurement and data analysis**

Kinematic quantities, strains and hydrodynamic pressures are usually measured.

The kinematic quantities (velocities and accelerations) allow the determination of the natural frequencies and modal shapes: in general, use is made of seismometers, which, for their high sensitivity, are more suitable than accelerometers to measure low amplitude motions.

A new-concept instrument, very useful when the positioning of the sensors on the dam is difficult, is the laser interferometer, by means of which the vibration velocity component in the direction of the laser beam can be picked-up at a maximum distance of 200÷250 m.

Positions and number of the measuring points are chosen with the aim of picking-up the motion of the abutments and of determining in the most accurate way the resonance frequencies and the relevant modal shapes.

The presently available instruments do not allow to measure the very low strains generated by forced tests; however on the joints or cracks it is possible to install relative displacement transducers, that are able to pick up their opening and sliding.

Hydrodynamic pressures are measured by means of hydrophones and pressure cells, located on the upstream face of the dam at different depths along the central cross-section. The values of the hydrodynamic pressures typically vary between 10 and 500 Pa.

Les signaux provenant des capteurs sont recueillis, amplifiés et mémorisés par un système digital d'acquisition de données, qui très souvent effectue également le contrôle de fréquence et d'amplitude de l'excitation ainsi qu'un traitement préliminaire (calcul en temps réel des fonctions de transfert et première estimation du nombre et du type de modes).

Le traitement des données avec identification des paramètres modaux fait l'objet d'une seconde phase.

### 3. EXEMPLE

Comme exemple d'efficacité et de capacité des essais de vibration forcée, il est apparu intéressant de présenter les travaux expérimentaux approfondis exécutés sur le barrage Talvacchia (Italie).

Le programme de recherches destiné à développer un nouveau « système de surveillance dynamique active » représente une application avancée de la méthode, à la fois sur le plan du matériel perfectionné utilisé et sur le plan de l'étendue du programme qui recouvre tous les aspects d'un processus de surveillance; en fait, le système installé :

- est capable de fournir des données de référence précises (paramètres modaux) pour la validation du modèle numérique du barrage;
- contribue à une connaissance plus approfondie de l'influence de divers paramètres (température, ouverture de joint, etc.);
- constitue une base pour une nouvelle technique de diagnostic.

Le barrage Talvacchia est un barrage-voûte, situé sur la rivière Castellano (Italie-Marche); ses caractéristiques sont les suivantes : hauteur : 77,12 m, longueur en crête : 225,85 m, capacité totale de retenue :  $14,35 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Dans le cadre du programme de recherches sus-mentionné, un dispositif complexe d'excitation et de mesure a été installé sur le barrage, permettant d'exécuter périodiquement des essais de vibration forcée et d'enregistrer toutes les grandeurs (statiques et dynamiques) décrivant le comportement du barrage.

Le dispositif comprend en particulier (Fig. 1) \* :

- un vibreur mécanique, situé dissymétriquement à l'intérieur de la galerie supérieure, sous la crête, et produisant une force sinusoïdale dans la plage de valeurs 2,7-36 kN;
- un réseau fixe de sismomètres (10 capteurs) destinés à mesurer la réponse du barrage à l'excitation forcée et également à un séisme éventuel; ce nombre réduit d'appareils a été choisi en se basant sur les résultats plus détaillés fournis par trois séries préliminaires d'essais de vibration forcée (correspondant à trois niveaux différents de retenue), la réponse ayant été mesurée en 77 points en ajoutant provisoirement de nouveaux appareils au réseau fixe de sismomètres;
- un réseau fixe d'accéléromètres (13 capteurs) destinés à mesurer la réponse du barrage à un séisme éventuel;

---

\* Les Figures 1 à 4 sont données à la fin de l'Annexe 1.

The signals from sensors are collected, amplified and memorised by a digital data acquisition system, that, in many cases, also performs the frequency and amplitude control of the excitation and a preliminary processing (real-time calculation of the transfer functions and first estimate of the number and type of modes).

The data processing with the identification of modal parameters is then completed in a second phase.

### 3. EXAMPLE

As an example of the effectiveness and capability of the forced vibration tests, it is believed useful to illustrate the extensive experimental activity carried out on the Talvacchia dam (Italy).

The research program aimed at developing a new “ active dynamic surveillance system ” actually represents an advanced application of the method, both for the up-to-date equipment used and for the wideness of the program itself that simultaneously covers all the aspects of a surveillance process; in fact the installed system:

- is capable of producing accurate reference data (modal parameters) for the validation of the numerical model of the dam;
- contributes to a deeper knowledge of the influence of various parameters (temperature, joint opening, etc.);
- is a basis for a new diagnostic technique.

The Talvacchia dam is an arch dam on the Castellano river (Marche-Italy); its geometric characteristics are : height : 77.12 m, crest length : 225.85 m, total storage capacity :  $14.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

In the frame of the above mentioned research program, a complex excitation and measurement system has been installed on the dam, capable of periodically performing forced vibration tests and of recording all the quantities (static and dynamic) of interest to describe the dam behaviour.

In particular the system consists of (see Fig. 1):

- a mechanical vibrator placed in asymmetric position inside the highest gallery under the crest and delivering a sinusoidal force in the range of 2.7-36 kN;
- a fixed seismometers network (10 transducers) to measure the dam response to both the forced excitation and a possible earthquake; this reduced number of instruments has been chosen on the basis of the more detailed results of three preliminary series of forced vibration tests (carried out in three different water level conditions) in which the response has been measured at 77 points, temporarily adding new instruments to the fixed seismometers network.
- a fixed accelerometer network (13 transducers) to measure the dam response to a possible earthquake;

---

\* Figures 1 to 4 are given at the end of Appendix 1.

- un réseau fixe de divers appareils pour mesurer plusieurs grandeurs statiques telles que : déplacements en crête (composantes radiale et tangentielle), mouvements de joints, répartition de la température, etc.;

- un système de contrôle remplissant les fonctions fondamentales suivantes :

- contrôle du vibreur mécanique et réalisation d'un essai de balayage sinusoïdal, toutes les 12 heures, dans la plage de fréquences 3-11 Hz;

- acquisition des données des sismomètres et calcul des fonctions de transfert ;

- acquisition des grandeurs statiques toutes les six heures, et avant et après l'exécution des essais dynamiques;

- enregistrement de la réponse du barrage à un séisme éventuel.

L'exploitation continue du système pendant 4 ans a fourni les principaux résultats suivants :

- étalonnage du modèle mathématique aux éléments finis, à partir des données de référence obtenues au moyen d'une détermination précise des paramètres modaux des 6 premiers modes (Fig. 2);

- étalonnage du modèle d'interaction barrage/retenue, en comparant les résultats numériques avec les mesures de pression hydrodynamique effectuées sur le parement amont à diverses hauteurs et dans la retenue à une distance du barrage atteignant 50 m;

- contrôle continu du comportement statique et dynamique. Le dispositif a été exploité pendant 4 ans, permettant ainsi d'obtenir une riche documentation sur le comportement du barrage. Les fonctions de transfert sont directement associées aux grandeurs statiques telles que : le niveau de retenue, la répartition de la température, l'ouverture des joints, etc. (Fig. 3, 4).

Parmi les résultats les plus intéressants obtenus, on peut mentionner :

- les variations de fréquence naturelle des 6 premiers modes sont de l'ordre de 5-10 % et sont principalement dues à la variation du niveau de retenue;

- il n'y a pas de relation univoque entre les fréquences naturelles et le niveau de retenue; cette relation est, en fait, fortement affectée par l'état des joints et donc par la répartition de la température.

Ce phénomène est particulièrement évident pour les niveaux bas de retenue puisque, dans de telles conditions, la température peut produire une ouverture de joints, tandis que le comportement dynamique est plus régulier et répétitif pour les niveaux élevés de retenue (Fig. 4).

#### **4. CONCLUSIONS**

L'exemple présenté et la riche documentation disponible permettent d'aboutir aux importantes conclusions suivantes :

- La méthode des essais de vibration forcée peut être considérée comme « mûre » pour des applications courantes, au moins dans le cas de barrages en

- a fixed network of various instruments to measure several static quantities of interest such as: crest displacements (radial and tangential components), joint movements, temperature distribution, etc.;

- a control system performing the following basic functions.

- to control the mechanical vibrator and to carry-out a sinusoidal sweep test every 12 hours in the frequency range from 3 to 11 Hz;

- to perform the acquisition of seismometers data and to computer transfer functions;

- to acquire static quantities every six hours and before and after the execution of the dynamic tests;

- to record the dam response in case of an earthquake.

The continuous operation of the system for 4 years led to the following main results:

- the calibration of the F.E. mathematical model based on reference data obtained through a precise determination of modal parameters of the first 6 modes (Fig. 2);

- the calibration of the dam/reservoir interaction model by comparing numerical results with hydrodynamic pressure measurements taken on the upstream face at different heights and in the reservoir at a distance up to 50 m from the dam;

- the continuous monitoring of the static and dynamic behaviour. The system has been operated for 4 years, thus obtaining an extremely rich documentation on the dam behaviour. The transfer functions were directly related to static quantities such as: water level, distribution of the temperature, joint opening, etc (Fig. 3, 4).

Some of the most interesting results obtained can be summarized as follows:

- the natural frequency variations of the first 6 modes are approximately 5-10% and they are mainly due to the variation of the water level;

- there is no univocal relation between natural frequencies and water level; this relation is, in fact, strongly affected by the state of the joints and consequently by the temperature distribution.

This phenomenon is particularly evident in the range of low values of water level since in such condition temperature can produce a joint opening, while the dynamic behaviour is more regular and repeatable in the range of high values of water level (Fig. 4).

#### **4. CONCLUSIONS**

The example reported and the rich available literature enable to reach important conclusions :

- The method of forced tests can presently be considered “ mature ” for a routine application, at least in the case of concrete dams: the measuring equipment

béton : les appareils de mesure actuellement disponibles sont de fait adéquats et tout à fait fiables; la procédure expérimentale est bien vérifiée et peut être facilement appliquée par des techniciens bien entraînés.

- L'interprétation des données au moyen de modèles mathématiques est relativement simple et fiable lorsque le barrage est considéré comme un corps homogène (c'est-à-dire lorsque les joints sont fermés, comme dans le cas « niveau maximal de retenue »).

Cependant, les modèles mathématiques doivent être améliorés en vue de reproduire le comportement dynamique du barrage en tenant compte de l'ouverture des joints et de la répartition des températures.

- Les essais de vibration forcée peuvent être inclus dans le programme de surveillance de barrage : en effet, ils permettent de compléter, avec des données supplémentaires extrêmement utiles, le cadre des mesures statiques traditionnelles. Avec plus d'expérience et de données (en particulier, pour les cas d'ouvrages endommagés), l'essai de vibration forcée pourra devenir également une importante méthode de diagnostic.

nowadays available is in fact adequate and is quite reliable; the experimental procedure is well tested and can be easily applied by trained technicians.

- The data interpretation through mathematical models is relatively simple and reliable when the dam is considered as an homogeneous body (that is when the joints are closed as in the condition of the maximum water level).

However, mathematical models must be improved in order to reproduce the dynamic behaviour of the dam taking into account the opening of the joints and the distribution of the temperatures.

- The forced tests can be included in the program of structural surveillance of dam: in fact they make it possible to integrate, with extremely helpful additional data, the frame of the traditional static measurements. With more experience and data (especially relative to cases of damaged structure), the forced vibration test could become also an important diagnostic method.

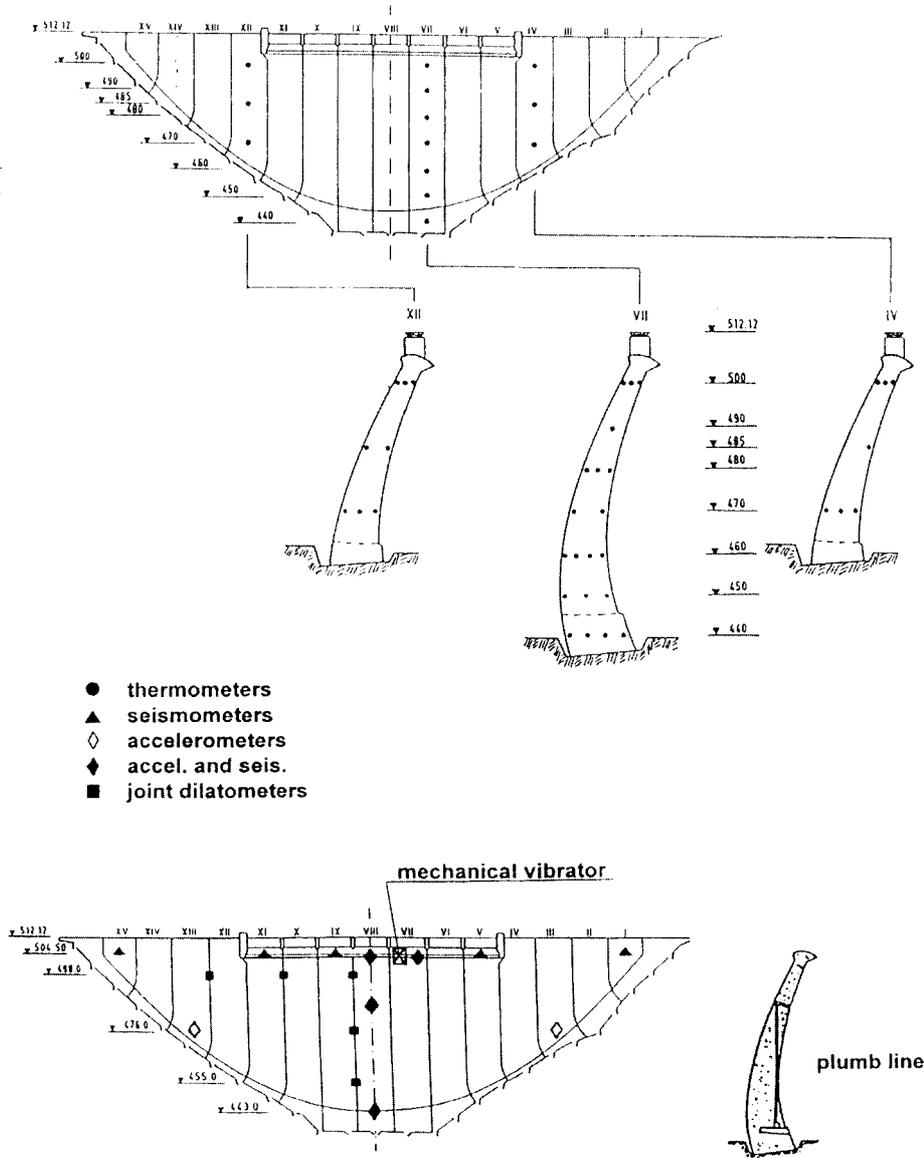


Fig. 1

The transducer network of the Talvacchia dam  
Réseau de capteurs du barrage Talvacchia

Thermometers  
Seismometers  
Accelerometers  
Accel. and seis.  
Joint dilatometers  
Mechanical vibrator  
Plumb line

Thermomètres  
Sismomètres  
Accéléromètres  
Accél. et sism.  
Jauges d'ouverture de joint  
Vibrateur mécanique  
Pendule

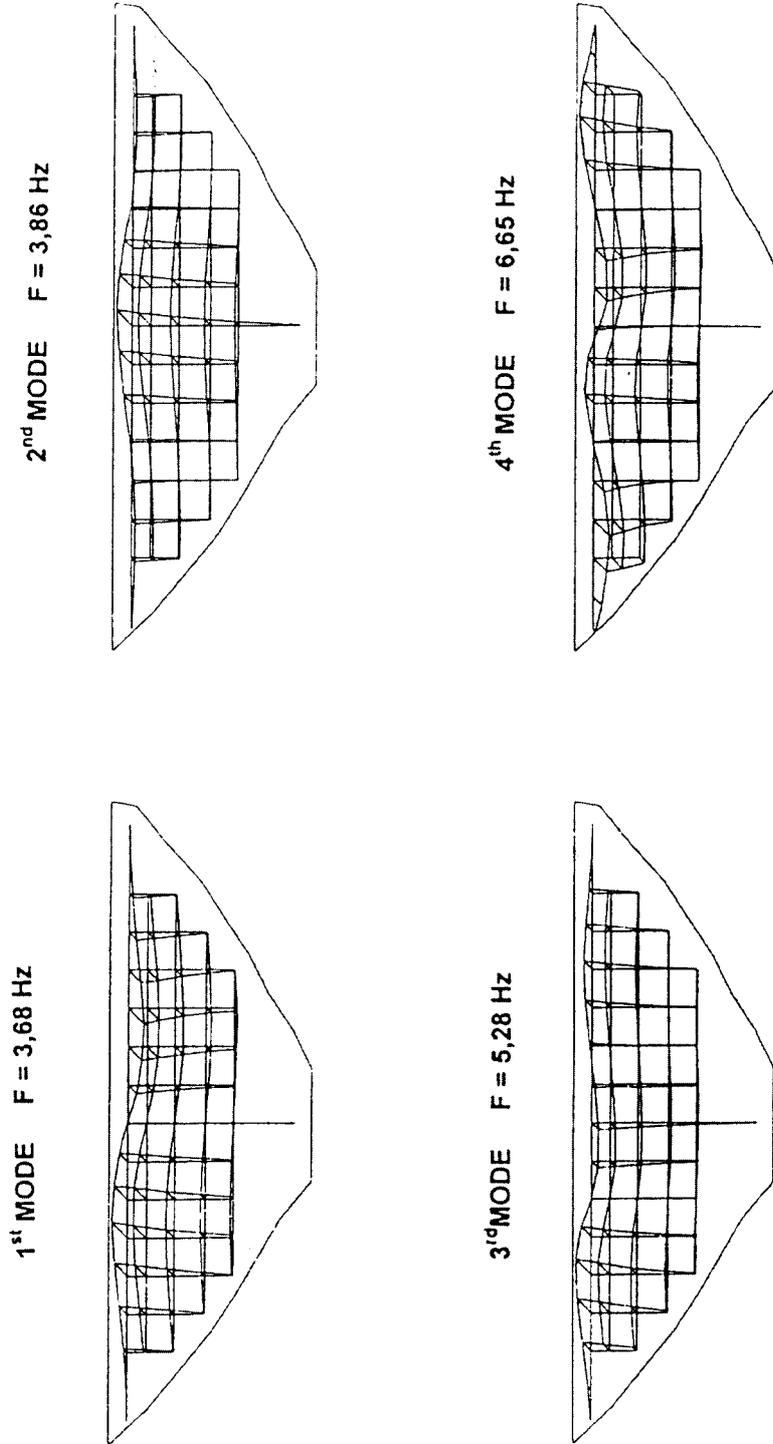


Fig. 2  
 First vibration modes of the dam, determined from forced vibration test  
*Premiers modes de vibration du barrage, déterminés à partir de l'essai de vibration forcée*

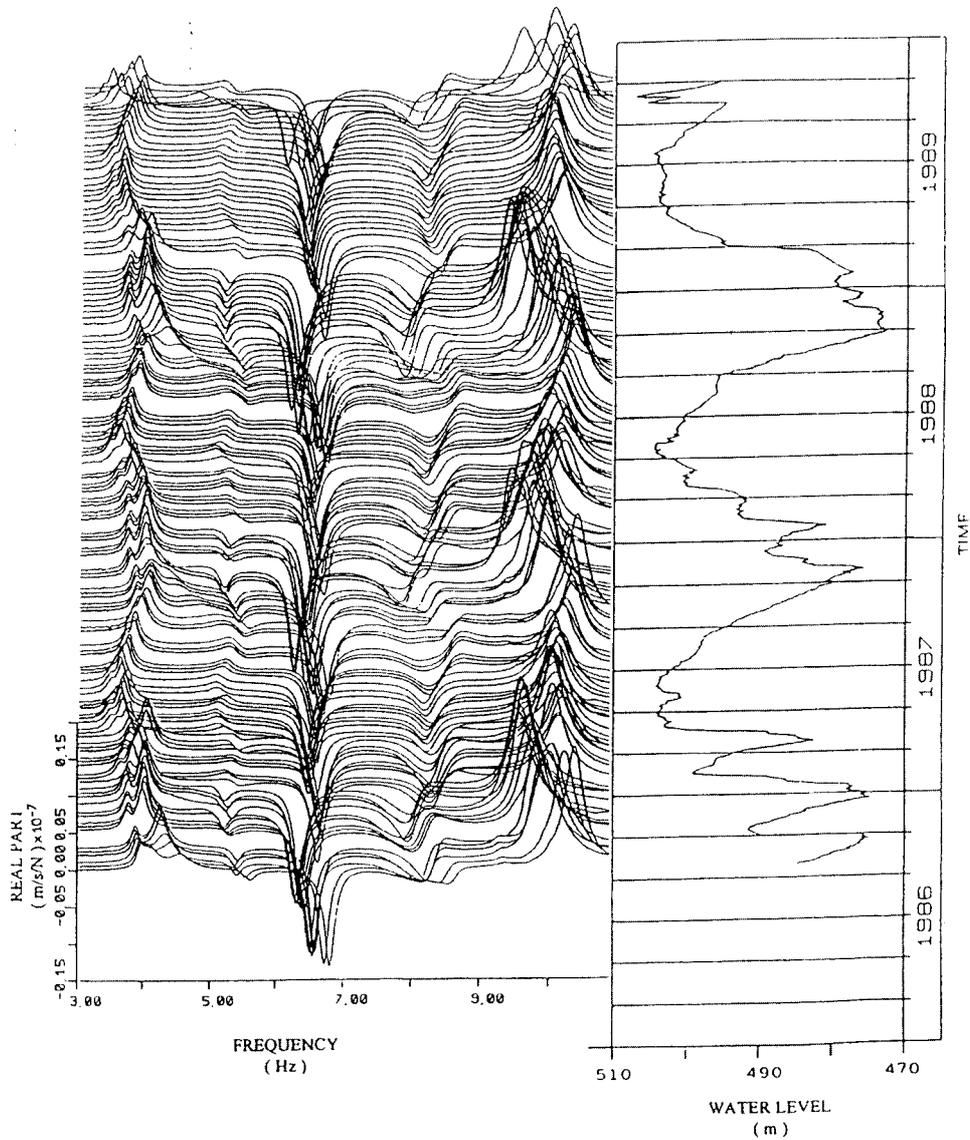


Fig. 3

Transfer functions from forced vibration tests

*Fonctions de transfert déduites des essais de vibration forcée*

Real part  
Frequency  
Water level  
Time

*Partie réelle  
Fréquence  
Niveau de retenue  
Temps*

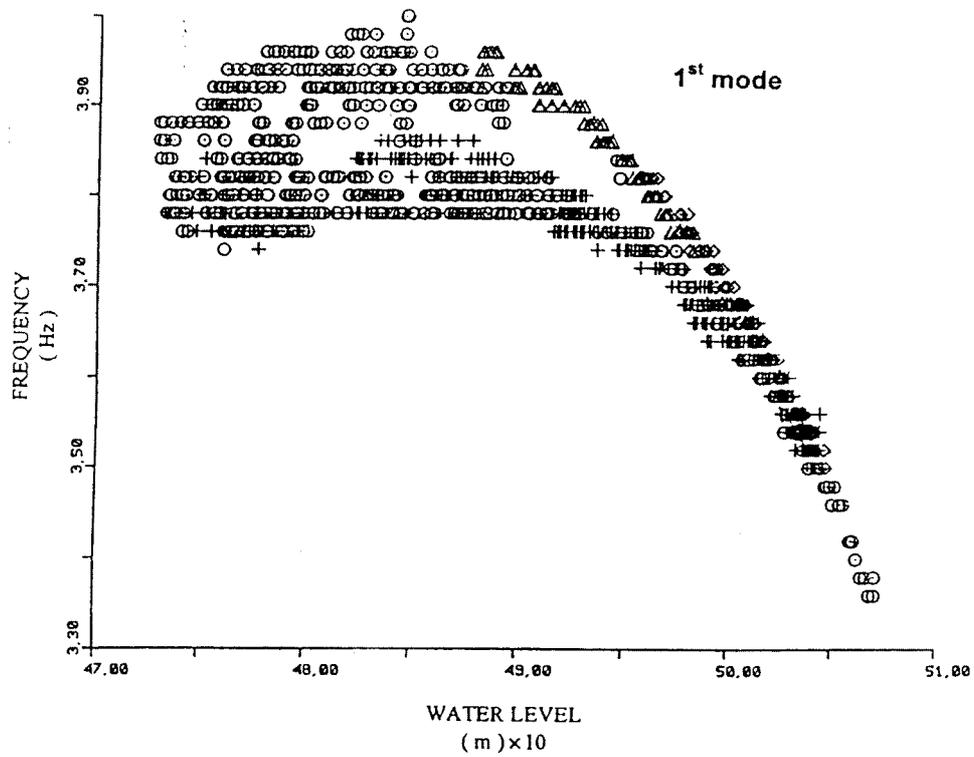


Fig. 4

First mode's frequencies versus water level

*Fréquences de premier mode en fonction du niveau de retenue*

Frequency  
Water level

*Fréquence  
Niveau de retenue*

---

## ANNEXE 2

---

### EXEMPLES

#### 1. BARRAGE KUROBE

##### 1.1. Introduction

Le barrage Kurobe, du type voûte, est situé sur la rivière Kurobe. Sa hauteur est de 186 m, sa longueur en crête de 500 m et son volume de 1 600 000 m<sup>3</sup>; la retenue a une superficie de 3,5 km<sup>2</sup> environ et une capacité totale de l'ordre de 200 millions de m<sup>3</sup>.

Le barrage a été achevé en juin 1963, mais le remplissage de la retenue commença avant la fin des travaux de bétonnage : à partir de 1960, le niveau de retenue a été élevé de 10/15 m chaque année, le niveau normal de retenue ayant été atteint dix ans plus tard, en 1969.

Compte tenu des grandes dimensions du barrage et de la retenue, du type d'ouvrage et du risque sismique, un réseau étendu d'appareils a été installé dans le barrage et sa fondation pour la mesure des microséismes et des fortes secousses sismiques. En outre, des essais de chargement de la roche de fondation destinés à mesurer les ondes de microsecousses résultant de fortes contraintes, des mesures de vibrations du sol au cours du fonctionnement et de l'arrêt du matériel de chantier, ainsi que des essais de vibration forcée sur le barrage terminé, pour deux niveaux de retenue, ont été exécutés.

Les données fournies par cet important ensemble d'appareils et d'essais ont conduit à des progrès significatifs dans le domaine de la technique sismique appliquée aux barrages.

##### 1.2. Appareils de mesure

Des microséismes ont été mesurés près du barrage et de sa fondation. Les appareils de mesure étaient les suivants : dispositif de mesure de microvibrations, dispositif portable de mesure de microvibrations, et un sismographe électromagnétique Hagiwara (HES). Ces trois types d'appareils étaient utilisés de manière interdépendante, en tirant avantage des caractères uniques de chaque appareil.

Un réseau étendu de capteurs pour la mesure des séismes d'intensité supérieure à 1 et de leurs effets fut aussi installé. Il comprenait : un sismographe Ishimoto, des sismographes type SMAC, et des appareils auscultant le barrage et la roche de fondation, les mouvements dynamiques à l'intérieur du barrage et les pressions interstitielles dynamiques. En outre, des appareils furent installés pour définir le

---

## APPENDIX 2

---

### CASE STUDIES

#### 1. KUROBE DAM

##### 1.1. Introduction

Kurobe is a dome type arch dam located on the Kurobe river. It is 186 m high, its crest is 500 m long and its volume is 1 600 000 m<sup>3</sup>; the reservoir area is about 3.5 km<sup>2</sup> and the total storage capacity is approximately 200 million m<sup>3</sup>.

The dam was completed in June 1963 but the impounding was undertaken prior to the completion of the concrete placement: since 1960, the water level of the reservoir has been raised by 10/15 m each year, reaching the full reservoir water level ten years later, in 1969.

Due to the high values of the dimensional parameters of the dam and reservoir and considering the structural type and the seismic risk, a large network of instruments was set in the dam and in its foundation for the measurement of both micro-earthquakes and strong motion earthquakes; in addition, loading tests of the foundation rock, aiming at measuring micro shock waves arising from large stresses, measurement of ground vibrations during the operation and non operation of the construction machinery, as well as forced vibration tests on the completed dam for two levels of reservoir impounding were performed.

Data from this large set of instruments and tests originate significant progress on earthquake engineering applied to dam.

##### 1.2. Instrumentation

Micro earthquakes have been measured near the dam and the dam foundation. The instrumentation consisted of : micro vibration measuring devices, portable microvibration measuring devices, and an Hagiwara Electromagnetic Seismograph (HES). These three types of instruments were used interdependently, taking advantage of the unique characteristics of each of them.

A large sensor network for the measurement of earthquakes with a seismic intensity greater than 1 and of their effects was also installed; it consisted of: an Ishimoto's seismograph, SMAC type seismographs and instruments monitoring the dam and foundation rock, the dynamic movements within the dam and the dynamic pore water pressures. Moreover, instruments were installed to identify the dynamic

comportement dynamique du barrage et de sa fondation rocheuse (modes de vibration, fréquences prédominantes, réponse du barrage aux séismes). Le dispositif de déclenchement était situé en crête du barrage, à la cote 1440 m, dans la direction de l'axe de la rivière.

Des appareils Carlson furent installés pour mesurer les contraintes dynamiques et les déformations unitaires dynamiques au cours des séismes; des capteurs électromagnétiques de sensibilité élevée ont été aussi installés à l'achèvement du barrage pour la mesure des déformations unitaires dynamiques.

Des cellules de pression interstitielle mesurant les variations dynamiques de pression dans des tubes piézométriques à l'intérieur de la fondation rocheuse, au cours de séismes, furent aussi mises en place.

### **1.3. Résultats des mesures**

#### *1.3.1. Microséismes*

Les enregistrements microsismiques ont été utilisés pour l'analyse :

- des microvibrations lors de la mise en charge initiale;
- de « l'ultra-microvibration » pour des charges répétées;
- de la relation entre les enregistrements HES (sismographe électromagnétique Hagiwara) et le niveau de retenue;
- des caractéristiques de fréquence prédominante de « l'ultra-microséisme » se manifestant près et loin du barrage;
- des enregistrements HES de l'essai de séismes de Matsushiro.

En ce qui concerne ces derniers séismes, il faut indiquer qu'ils débutèrent en août 1965, leur épicerie étant dans la ville de Matsushiro située à environ 50 km au nord-est du barrage Kurobe.

Ces séismes contribuèrent aux études géophysiques et à la prévision des séismes, en fournissant de nombreuses données. Les données recueillies furent également utiles pour la connaissance des propriétés dynamiques de la fondation rocheuse du barrage Kurobe.

Une relation entre le remplissage de la retenue de Kurobe et la série de séismes de Matsushiro n'est pas apparue évidente.

#### *1.3.2. Observations sismiques*

Au cours de la période ayant suivi la construction, de novembre 1965 à décembre 1981, 247 séismes furent enregistrés par le sismographe Ishimoto situé dans la rive droite près de l'appui du barrage; 173 séismes furent mesurés par les dispositifs installés dans le barrage et la fondation rocheuse, de janvier 1966 à décembre 1981, et 13 séismes furent enregistrés en crête du barrage, avec des accélérations supérieures à 10 gal.

L'analyse de ces enregistrements a permis d'obtenir d'importants résultats concernant :

behaviour of the foundation rock and of the dam, including vibration modes, the predominant frequencies as well as the response of the dam to earthquakes. The triggering device was installed in the dam crown, at El. 1440 m, in the stream direction.

Carlson meters were installed to detect dynamic stresses and dynamic strains during earthquakes; high sensitive electromagnetic pick-ups for dynamic strain measurements have also been embedded at dam completion.

Some dynamic pore water pressure instruments measuring dynamic changes in pressure within piezometer holes in the foundation rock during earthquakes were also installed.

### **1.3. Results of measurements**

#### *1.3.1. Microearthquakes*

The microearthquake records have been used for the analysis of :

- Micro vibrations at the stage of initial loading;
- Ultra Micro vibration for repeated load;
- the relation between the HES records and the reservoir water level;
  
- the predominant frequency characteristics of Ultra Micro Earthquake occurring close to and far from the dam;
- the HES records of Matsushiro Earthquake swarm.

As to this last point, it has to be underlined that Matsushiro swarm began in August 1965, with its center in Matsushiro Town, located about 50 km east-northeast far from the Kurobe dam.

The Matsushiro swarm contributed much data to geophysics and earthquake prediction. In addition, it provided useful data for the understanding of the dynamic properties of the Kurobe Dam foundation rock.

Relationship between the impounding to the Kurobe Dam reservoir and Matsushiro swarm has not ever become obvious.

#### *1.3.2. Earthquake observations*

In the period following the construction, from November 1965 to December 1981, 247 earthquakes were measured by the Ishimoto's seismograph placed in the right bank near to the abutment of the dam; 173 earthquakes were measured by the devices located in the dam and in the foundation rock from January 1966 to December 1981 and 13 earthquakes were recorded at the dam crest with accelerations over 10 gal.

The analysis of these records has allowed to obtain important results concerning :

i) l'amplification de la réponse du barrage dans chaque direction, définie, pour une direction, comme le rapport entre l'accélération maximale en crête du barrage et l'accélération maximale dans la fondation rocheuse;

ii) les fréquences naturelles du barrage, déduites de l'analyse des spectres d'énergie des enregistrements des six sismographes installés dans le corps du barrage ; ces valeurs furent comparées, pour divers niveaux de retenue, avec celles déduites des essais de vibration forcée sur le barrage;

iii) les coefficients d'amortissement;

iv) la différence entre les mouvements sismiques enregistrés sur la rive droite et sur la rive gauche : les enregistrements des sismographes ont montré nettement que les mouvements sismiques sur le site du barrage n'étaient pas toujours les mêmes sur les rives droite et gauche, ce qui a conduit à des études basées sur la détermination des accélérations maximales, des spectres d'énergie et des fonctions de cohérence;

v) les caractéristiques non stationnaires du mouvement sismique ; pour cette étude, les enregistrements furent divisés en petites sections et une analyse spectrale de chaque section fut effectuée, ce qui permit de mieux connaître le comportement du barrage et l'évolution de sa réponse au cours des séismes.

## **2. HAUT BARRAGE D'ASSOUAN**

Le Haut Barrage d'Assouan (High Aswan Dam, HAD) est du type « en enrochement », avec un noyau d'argile et un rideau d'injection. D'une hauteur de 111 m et d'une longueur en crête de 3 600 m, il est construit sur le Nil (Égypte) à 7 km au sud d'Assouan; la capacité de la retenue est de 162 km<sup>3</sup>, constituant ainsi l'un des plus grands lacs artificiels dans le monde. La construction débuta en 1960 et s'acheva en 1970.

Le HAD est un ouvrage à buts multiples, sur lequel repose le développement industriel, agricole et économique de l'Égypte. La centrale hydroélectrique a une productibilité de 10<sup>9</sup> kWh, et la retenue assure une fourniture d'eau renouvelable et une protection contre les crues et les sécheresses qui ravagèrent l'Égypte par intermittence dans le passé.

À l'époque des études de projet, il fut admis que la sismicité de la zone d'Assouan était faible. Néanmoins, compte tenu de l'importance vitale du HAD, la stabilité du barrage fut vérifiée pour un séisme d'intensité VIII sur l'échelle MSK numérotée de I à XII, ce séisme prenant naissance sur une faille dans la zone de la Mer Rouge, côté Assouan.

Le 14 novembre 1981, un séisme modéré, de magnitude 5,3 sur l'échelle de Richter, se produisit à environ 53 km au sud-ouest du HAD. La manifestation soudaine de ce séisme causa de vives inquiétudes à la population et au gouvernement, en raison de l'importance vitale du barrage pour l'Égypte et de la concentration d'une grande partie de la population égyptienne dans la vallée et le long du delta à l'aval du barrage. Aussi fut-il décidé d'entreprendre une étude approfondie pour identifier les failles pouvant engendrer des séismes dans la zone

i) the response magnification of the dam in each direction, defined, for that direction, as the ratio between the maximum acceleration at the dam crest and maximum acceleration at the foundation rock;

ii) the natural frequencies of the dam, obtained through the power spectral analysis of the records of the six seismographs installed in the dam body; these values were compared for different water levels with those obtained from the forced vibration tests of the dam;

iii) the damping coefficients;

iv) the difference between the earthquake motions recorded on right and left banks: seismograph records clearly show that the seismic motion at the dam site was not always the same for the right and left banks, so studies were carried-out based on the determination of maximum accelerations, power spectra and coherence functions;

v) the non-stationary characteristics of earthquake motion; for this study, records were divided in small sections and a spectral analysis of each section was carried out, thus allowing a deeper understanding of the dam behaviour and of the evolution of its response during earthquakes.

## **2. HIGH ASWAN DAM**

High Aswan Dam (HAD) is a rockfill dam with clay core and grout curtain. It is 111 m high and 3 600 m long and it is built on the main river Nile, Egypt, 7 km south of Aswan; the storage capacity of the reservoir is 162 km<sup>3</sup>, thus being one of the world's largest man-made lake. Construction started in 1960 and was completed in 1970.

The HAD is intended to be multipurpose, since it is the base upon which Egypt's industrial, agricultural and economic welfare rests. It has an hydropower station with a capacity of 10<sup>9</sup> kWh per year, being at the same time, the only source of renewable surface water supply and a protection against floods and drought that intermittently ravaged Egypt for thousands of years in the past.

In the design studies, consideration was given to seismic stability assuming that the Aswan area is not a very seismic area. Because of the critical importance of HAD, the stability of the dam was tested for an earthquake shaking of intensity VIII on the 12 grade MSK scale, generated from distant earthquakes on a fault in the Red Sea area in Aswan.

On 14 November 1981 a moderate earthquake of magnitude 5.3 Ms occurred about 53 km Southwest of HAD. The sudden occurrence of this earthquake caused a significant concern among the people and in the government due to the vital importance of the dam to the welfare of Egypt and due to the fact that most of the Egyptian population is concentrated in the valley and along the delta downstream the dam. Therefore, it was decided to undertake a comprehensive study to evaluate the faults capable of releasing earthquakes in the Aswan area,

d'Assouan, évaluer le risque sismique et la capacité du barrage à résister à des niveaux identifiés de secousses sismiques.

Des sismographes à gain élevé furent installés et exploités en vue d'obtenir une couverture sismographique de l'extrémité nord de la retenue. Le 13 décembre 1981, un mois environ après la secousse principale, l'Egyptian Geological Survey and Mining Authority (EEGs) installa un réseau de six sismographes portables autour de la zone sismique, qui furent exploités jusqu'en juillet 1982; début juillet, un réseau de télémesure fut mis en place, comportant initialement huit stations et porté à treize stations début 1985.

Il faut indiquer qu'en 1975, après l'achèvement du barrage, deux stations sismiques furent installées à Assouan et à Abu Simbel dans la zone de la retenue. Ces deux stations enregistrèrent de petits séismes avant la secousse principale du 14 novembre 1981.

En plus du réseau de télémesure sismographique, sept accélérographes furent mis en place près du barrage : 4 dans le HAD, 2 dans le Vieux Barrage d'Assouan et 1 à Gebel Marawa près de la faille Kalabsha pour identifier la réponse de la croûte terrestre.

Un réseau de télémesure piézométrique fut également installé dans la zone nord de la retenue pour mesurer le niveau de la nappe phréatique et sa température; un réseau d'auscultation topographique comportant 16 points de mesure fut construit autour de la faille Kalabsha pour mesurer ses déplacements et évaluer son comportement et son potentiel d'énergie.

Les enregistrements du premier réseau sur sept mois et ceux du réseau de télémesure sur presque quatre ans ont permis une connaissance détaillée de l'activité sismique récente se manifestant à l'extrémité nord de la retenue HAD. L'auscultation sismique montre une étroite relation entre la faille Kalabsha et la secousse principale du 14 novembre 1981 et une grande partie de la sismicité locale ultérieure.

Les stations de télémesure sont toujours exploitées et leurs mesures sont reçues au Centre Sismologique situé près du HAD. Les données reçues sont interprétées chaque mois et des rapports annuels établis.

Les rapports annuels indiquent qu'une activité sismique existe toujours autour de la faille Kalabsha, cette activité étant toutefois caractérisée par une plus faible magnitude. Dans le rapport de 1988, la plupart des séismes (124) ont une magnitude inférieure à 2,0 (échelle de Richter) et 4 seulement atteignent une magnitude de 3,5. La profondeur des foyers de la plupart des séismes se situe entre 13 et 24 km.

En février 1984, une étude sur deux ans fut entreprise avec examen de cartes, de plans et de documents techniques. Dans ce cadre, une étude de la sismicité de la zone supérieure et de la Mer Rouge fut exécutée, en se basant sur les enregistrements historiques et les données enregistrées par des appareils provisoires et permanents. Cette étude permit de conclure que la région d'Assouan est caractérisée par une faible sismicité (caractéristique des zones stables de bouclier continental) et que le séisme du 14 novembre 1981 survint sur la faille Kalabsha à une profondeur de 18-20 km.

Une cartographie par photos aériennes fut exécutée, des tranchées de reconnaissance creusées le long des failles et des échantillons prélevés pour étudier

the seismic hazard and the ability of the dam to withstand identified levels of seismic shaking.

High-gain seismographs were installed and operated to provide seismographic coverage of the northern end of the HAD lake. On 13 Dec. 1981, about one month after the main shock, the Egyptian Geological Survey and Mining Authority (EEGs) installed a network of six portable seismographs surrounding the after shock zone, which was operated until July 1982; early in July a telemeter network was installed, which was initially configured with eight stations and then upgraded to thirteen stations in early 1985.

It is worth mentioning that in 1975 after the completion of the dam, two seismic stations were installed in Aswan and Abu Simbel in the region of the lake. These two stations recorded minor earthquakes before the main shock of 14 November 1981.

In addition to the telemetered network of seismographs, seven accelerographs were placed near to the dam, namely: 4 in the HAD, 2 in the Old Aswan Dam and 1 at Gebel Marawa near Kalabsha fault to identify the response of the crust.

A telemetered net of piezometers was also installed in the northern part of the lake to monitor the underground water level and its temperature and a geodetic survey network of 16 points was constructed around Kalabsha fault to monitor its displacements, trying to assess the behaviour of the fault and its stress energy.

The seven-month recording of the first network and the almost four-year recording of the telemetered network allow a detailed understanding of the recent earthquake activity occurring at the northern end of HAD lake. The seismic monitoring shows a close association between the Kalabsha Fault and the main shock of 14 November 1981 and much of the subsequent local seismicity.

The telemetered stations are still operating and received at the Earthquake Center nearby the HAD. Data are recorded, received and interpreted monthly and annual reports are produced.

The annual reports show that the seismic activity is still around Kalabsha fault, even though it is characterised by a smaller magnitude. In 1988 report, most events (124 events) have magnitude smaller than 2.0 Ms and only 4 events are of 3.5 Ms. The focal depth of most events is between 13.0 and 24.0 km.

In February 1984 a two-year study began with the review of maps, engineering drawings and literature. In this frame a seismicity study of the Upper and Red Sea area was carried out, based on historical records and data collected by temporary and permanent instruments. It was concluded that the Aswan area is characterised by low seismicity (typical of stable continental shield areas) and that the 14 November 1981 earthquake occurred on Kalabsha fault at a depth of 18-20 km.

Aerial reconnaissance and photographic mapping were carried out, exploratory trenches were excavated along faults and samples were also taken to assess the

la géologie sismique; cinq failles furent jugées significatives en raison de leur activité évidente et de leur proximité du HAD. Ce sont :

<b>Faille</b>	<b>Distance la plus proche du barrage</b>	<b>Magnitude max. du séisme (échelle de Richter)</b>
Kalabsha	44	7
Seiyal	53	7
Gabel el-Barauc	40	6,5
Kurkur	28	6,25
Khor el-Ranla	19	6

La faille Kalabsha apparaît comme la plus significative.

On conclut que le risque de sismicité induite par la retenue était très faible, le foyer de la sismicité se situant à une profondeur de 15-25 km, soit à une profondeur plus grande que celles des séismes induits connus et n'étant pas influencée par des percolations d'eau ou des pressions interstitielles provenant de la retenue. La corrélation entre les valeurs maximales de niveau de retenue et les pointes de sismicité n'était pas apparente.

Une analyse dynamique non linéaire par la méthode des éléments finis fut effectuée pour déterminer la réponse du remblai au Séisme d'Évaluation de la Sécurité et évaluer la stabilité sismique et les déformations potentielles.

Les résultats des études ont montré que la survenance du séisme maximal possible ne mettrait pas en danger la sécurité et l'intégrité du barrage et des ouvrages annexes.

Il fut recommandé de poursuivre les observations de l'activité sismique au moyen du réseau de télémessure sismique télémétrique de façon à mieux connaître la sismicité. Une amélioration de l'auscultation du barrage fut aussi recommandée.

### **3. RÉSULTATS DE MESURES SUR DES BARRAGES SOUMIS À DES SÉISMES AUX ÉTATS-UNIS**

#### **3.1. Barrage Lower Crystal Springs**

Le barrage Lower Crystal Springs est du type poids, en béton, incurvé en plan. D'une hauteur de 45 m, il est situé sur la rivière San Mateo et fut construit entre 1887 et 1890 (plots avec emboîtement). La retenue s'étend à l'intérieur du rift formé par la faille San Andreas et est située à 24 km environ au sud de San Francisco. En avril 1906, le grand tremblement de terre de San Francisco (magnitude estimée à 8,3 sur l'échelle de Richter) causa d'énormes dégâts dans la ville de San Francisco et ses environs. La principale rupture de faille traversait la retenue Lower Crystal Springs à 180 m environ à l'ouest du barrage; des déplacements relatifs de 2,5 à 3,0 m et des ruptures de surface, en « échelons », avec prédominance du côté droit, furent observés dans cette zone.

seismic geology; five faults were considered significant because of evident activity and being close to HAD. They are :

<b>Fault</b>	<b>Closer distance from dam</b>	<b>Max. Earthquake magnitude (Ms)</b>
Kalabsha	44	7
Seiyal	53	7
Gabel el-Baraue	40	6.5
Kurkur	28	6.25
Khor el-Ranla	19	6

It was found that Kalabsha fault is the most significant one.

It was also concluded that the risk of reservoir triggered seismicity is insignificant, being the focal depth of seismicity within the range of 15-25 km, therefore much deeper than that of known cases of induced seismicity and not influenced by penetration of water or pore pressure effects from the reservoir. Even the correlation of seasonal water level peaks and peaks in seismicity was not consistent.

Dynamic analysis through non linear finite element method was used to determine the response of the embankment to the Safety Evaluation Earthquake Motion and assess the seismic stability and potential deformations

The results of the studies show that the occurrence of the largest potential earthquake would not jeopardize the safety and integrity of the dam and its appurtenant structures.

It was recommended to continue monitoring the earthquake activity through the telemetered seismic network so to have a better understanding of seismicity. Also instrumentation upgrading to monitor the dam performance was recommended.

### **3. SOME DATA ON INSTRUMENTED DAMS UNDER EARTHQUAKE ACTION IN USA**

#### **3.1. Lower Crystal Springs Dam**

The Lower Crystal Springs Dam is a curved, concrete gravity structure. It is 45 m high and was constructed across San Mateo Creek, between 1887 and 1890, using interlocking blocks of placed concrete. The reservoir lies within the rift valley formed by the San Andreas Fault and is located about 24 km south of San Francisco. In April 1906, the Great San Francisco Earthquake (estimated magnitude 8.3) caused heavy damage to the City and the surrounding areas. The primary fault rupture passed the Lower Crystal Springs Reservoir approximately 180 m west of the dam; relative displacements of 2.5 to 3.0 m and predominantly right-lateral en "echelon" surface ruptures were reported in that area.

Des mouvements sur des ruptures de pente localisées furent également constatés le long de la rive orientale de la retenue, à environ 90 m du barrage Lower Crystal Springs. Les intensités furent estimées à IX sur l'échelle Rossi-Forel pour la zone du barrage.

Le barrage et ses ouvrages annexes supportèrent le séisme sans dommages, ce qui résulte principalement de la construction soignée du barrage.

Aucun appareil de mesure n'enregistra le séisme de 1906 sur le barrage et à proximité.

Plus tard, quinze capteurs, comprenant trois appareils SMA-1 pour fortes secousses, avec déclenchement commun, furent installés sur le site du barrage (Fig. 5) \* : un de ces appareils est situé en crête, un autre sur l'appui rive gauche, le troisième dans la roche à quelque distance à l'aval du barrage. Un déclenchement de ces appareils se produisit lors du séisme Loma Prieta du 17 octobre 1939, lorsque des accélérations de pointe de 0,05 g et 0,10 g furent enregistrées respectivement au pied et en crête du barrage. L'épicentre correspondant était situé à 69 km. De nouveau, le barrage ne fut pas affecté par cette secousse relativement modérée.

### **3.2. Barrage Lower van Norman**

Le barrage Lower van Norman, connu également sous le nom de barrage Lower San Fernando, est un ouvrage en remblai, de 42 m de hauteur, situé dans la région de San Fernando (Californie).

La plus grande partie du barrage a été réalisée par remblayage hydraulique, entre 1912 et 1915; l'ouvrage fut surélevé plusieurs fois entre 1916 et 1930 par mise en place de remblais compactés. La construction fut achevée en 1940.

Un important glissement du talus amont et de la crête du barrage se produisit dans la minute suivant le séisme San Fernando du 9 février 1971 (magnitude 6,5 sur l'échelle de Richter), centré approximativement à 11,2 km du barrage et engendré par une faille de chevauchement.

Les sismoscopes situés sur l'appui rocheux et en crête du barrage enregistrèrent des accélérations de pointe de 0,55 à 0,6 g environ sur l'appui, et de 0,55 g environ en crête. L'évolution dans le temps des mouvements du remblai fut connue en analysant les enregistrements des sismoscopes de crête, qui indiquèrent que le glissement de la crête débuta 26 secondes environ après l'arrêt de la secousse sismique et dura environ 50 secondes.

Ainsi, les importants mouvements de glissement se développèrent en l'absence de charges sismiques et furent seulement provoqués par les contraintes statiques dues à la charge des matériaux et à l'augmentation des pressions interstitielles à l'intérieur du remblai. La recharge aval fut le siège de tassements et de déplacements horizontaux atteignant 0,3 m, mais resta essentiellement intacte après le séisme.

---

\* Les Figures 5 à 7 sont données à la fin de l'Annexe 2.

Sympathetic movements on localized slope failures were also observed along the eastern shore of the reservoir about 90 m away from the Lower Crystal Springs Dam. The estimated intensities were IX on the Rossi-Forel Scale for the dam site area.

The dam and its appurtenant works survived the earthquake undamaged, which is primarily due to the careful construction of the dam.

No instruments recorded the 1906 earthquake at the dam or near to it.

Furthermore, fifteen sensors, including three SMA-1 strong motion instruments with common triggering have been installed at the dam site (Fig. 5)\* : one of the strong motion instruments is at the crest, one at the left abutment, and the third is in the rock some distance downstream the dam. These instruments were triggered during the October 17, 1939 Loma Prieta earthquake when peak accelerations of 0.05 g and 0.10 g were recorded at the base and at the crest of the dam, respectively. The corresponding epicentral distance was 69 km. Again the dam was unaffected by this comparatively moderate motion.

### **3.2. Lower van Norman Dam**

The Lower van Norman Dam, also known as the Lower San Fernando Dam, is a 42 m high embankment dam, located in San Fernando, California.

The embankment mainly consisted of hydraulic fill placed between 1912 and 1915 and it was raised several times between 1916 and 1930 by placing rolled fills. The construction finished in 1940.

A major slide of the upstream slope and crest of the Lower van Norman Dam occurred within about a minute after the San Fernando earthquake of February 9, 1971 (M 6.5), centered approximately 11.2 km from the Lower van Norman Dam and generated by thrust faulting.

Seismoscopes located on the bedrock abutment and at the crest of the dam provided records that showed a peak acceleration of about 0.55 to 0.6 g at the abutment and of about 0.55 g at the crest. Time history of the embankment motion was revealed by the analysis of the seismoscope record from the crest, which showed that slide movements of the crest started about 26 seconds after the earthquake shaking stopped and the slide duration was about 50 seconds.

Thus, the large slide movements developed in the absence of earthquake loads and were driven only by the static stresses due to the materials weight and to the increased pore pressures within the embankment: the downstream shell of the embankment developed settlements and horizontal displacements up to about 0.3 m but remained essentially intact after the earthquake.

---

\* Figures 5 to 7 are given at the end of Appendix 2.

### 3.3. Barrage Pacoima

Le barrage Pacoima est une voûte en béton, de 115 m de hauteur et de 180 m de longueur en crête. Il est situé sur la rivière Pacoima, près de la ville de San Fernando (Californie). Le barrage fut conçu comme une voûte à « angle constant », équivalente à un barrage-voûte d'épaisseur moyenne à double courbure modérée; sa construction fut achevée en 1929. Le barrage est implanté dans un canyon étroit aux versants raides.

Le séisme (magnitude 6,5 sur l'échelle de Richter) qui affecta la zone nord de la métropole de Los Angeles et la vallée de San Fernando, en février 1971, était centré approximativement à 6,5 km au nord du barrage Pacoima.

Deux appareils pour fortes secousses existaient sur le barrage au moment du séisme : l'un était un sismoscope Wilmot situé en crête près de la clé, l'autre un accélérographe AR-240 pour fortes secousses situé sur une arête rocheuse de l'appui rive gauche à environ 40 m de la voûte et 15 m au-dessus de sa crête. Ultérieurement, d'autres sismographes furent installés dans le barrage et ses appuis (Fig. 6).

Aucun enregistrement utilisable ne fut fourni par ces appareils car la plaque d'enregistrement en verre se desserra au début de la secousse sismique. L'accélérographe enregistra cependant les mouvements du sol. Les accélérations de pointe détectées à cette époque furent les accélérations sismiques les plus fortes jamais enregistrées et les premières obtenues à une distance aussi proche de l'épicentre d'un séisme important généré par une faille de chevauchement. Des pointes d'accélération de 1,25 g pour les composantes horizontales et de 0,7 g pour les composantes verticales furent enregistrées pendant la phase de forte secousse d'une durée approximative de 8 secondes. Cependant, les études effectuées après le séisme ont indiqué que ces fortes accélérations de pointe étaient probablement influencées par la situation de l'accélérographe sur le bord d'une arête étroite fortement fracturée, ayant pu conduire à des amplifications inhabituelles. Des études ultérieures permirent de situer les accélérations de pointe au pied du barrage dans une fourchette de 0,6 à 0,8 g.

Cette forte secousse affecta gravement la partie supérieure de l'appui rive gauche, causant une fissuration étendue du revêtement de gunite et un glissement d'une importante zone sur le versant aval de l'appui; une grande masse rocheuse diaclasée constituant deux blocs subit un réarrangement et des mouvements vers l'aval le long d'un plan de rupture incliné.

Les effets de pression et le réarrangement grossier des ouvertures de joints et des chemins de percolation dans les appuis provoquèrent une augmentation des débits de percolation dans les deux appuis, suivie d'une soudaine diminution; toutefois, ces débits restèrent plus élevés que les valeurs existant avant le séisme, pour tout niveau de retenue. Les niveaux phréatiques dans les piézomètres augmentèrent puis baissèrent brusquement pour se stabiliser à des niveaux mesurés avant le séisme, ce qui suggère aucun changement dans la perméabilité globale des appuis.

L'adaptation de la croûte terrestre dans la région causa un léger rapprochement des versants du canyon : raccourcissement de la corde de 24 cm environ, rotation de

### 3.3. Pacoima dam

The Pacoima dam is a concrete arch structure. It is 115 m high and has a crest length of 180 m. It was constructed across Pacoima Creek near S. Fernando, California. The dam was designed as a “ constant angle ” arch, equivalent to a medium-thick arch dam of moderate double curvature, and was completed in 1929. The dam is located in a narrow steep-walled canyon.

The earthquake (M 6.5) that affected the northern metropolitan area of Los Angeles and the San Fernando Valley in February 1971 was centered approximately 6.5 km north of the Pacoima dam.

Two strong motions recording instruments existed on the dam at the time of the earthquake: the first was a Wilmot seismoscope located on the crest of the dam near the center, the other, an AR-240 strong motion accelerograph, was located on the rock ridge on the left abutment about 40 m from the arch dam and 15 m above its crest. Afterwards other seismographs were added to the dam, its foundation and abutments (Fig . 6).

No useable record was obtained from the instruments, because the glass record plate was jarred loose during the early part of ground motion. The accelerograph, however, recorded the ground motions. The peak accelerations obtained that time were the highest earthquake accelerations ever recorded, and the first ones obtained at such a close distance from the epicenter of a significant earthquake generated by thrust faulting. High frequency acceleration peaks of 1.25 g for the horizontal components and 0.7 g for the vertical components, respectively, were recorded, for a total duration of the strong-motion phase of approximately 8 seconds. However post-earthquake studies have indicated that these high peak accelerations were probably influenced by the accelerograph's location on the edge of a narrow badly fractured ridge, which may have resulted in unusual amplifications. Subsequent studies suggested that peak horizontal accelerations at the base of the dam might have been in the range of 0.6 to 0.8 g.

As a consequence of this strong shaking, the upper left abutment was severely affected and suffered extensive gunite cover cracking and slumping of an extensive area on the downstream slope of the abutment; a major disturbed rock mass consisting of two blocks experienced rearrangement and some downward movement along a sloping failure plane.

Pressure effects and random rearranging of joint openings and seepage passages in the abutments resulted in an increase of seepage rates in drains in both abutments after the earthquake, followed by a sudden decrease, but in such way that those rates remain higher than pre-earthquake values for any given reservoir level; phreatic levels in piezometers increased, and were also followed by an abrupt decline, until they finally stabilized to pre-earthquake levels, suggesting no change in gross abutment permeability.

Regional crust adjustment caused a slight narrowing of the canyon, showed by a chord shortening of about 24 cm, a rotation of the dam axis by 30 seconds and a

l'axe du barrage de 30 secondes et inclinaison de la crête du barrage, l'appui rive droite s'étant abaissé de 1,7 cm par rapport à l'appui rive gauche. Ces mouvements furent absorbés en grande partie par une ouverture partielle du joint de contraction entre le barrage et la culée rive gauche – l'ouverture était de 6 à 10 mm et s'étendait de la crête jusqu'à une profondeur de 13,5 m où elle se terminait sur un joint de reprise horizontal; une fissure se forma également dans la culée rive gauche le long d'une ligne de reprise, sur une longueur de 1,5 m, en s'inclinant ensuite vers le bas pour atteindre la roche d'appui.

Aucune fissuration notable du barrage-voûte ni aucun mouvement relatif au contact barrage - fondation ne furent observés. Cet excellent comportement atteste la réserve considérable de résistance inhérente au barrage-voûte.

En ce qui concerne les ouvrages annexes, il faut signaler de légers dégâts dans la tour de prise et le coursier de l'évacuateur de crue; des fissures se produisirent également dans quatre nouvelles zones du revêtement en béton de la galerie de l'évacuateur de crue.

### **3.4. Barrage Long Valley**

Le barrage Long Valley est du type « en remblai zoné »; sa hauteur est de 54 m et sa longueur en crête de 180 m. Il est situé sur la rivière Owens, dans le comté de Mono (Californie) et fut achevé en 1941.

Le barrage est seulement à 5 km environ au sud-est de la bordure de Long Valley Caldera et à 5 km au nord-est des traces de surface du système de failles frontales de la Sierra Nevada.

Depuis un séisme de magnitude locale 5,8 survenu en octobre 1978, la zone du barrage Long Valley a subi presque continuellement, jusqu'en 1986, une série (ou essaim) de séismes de magnitude faible à modérée. Cette activité sismique intense (26 séismes de magnitude supérieure à 5 et 6 séismes de magnitude supérieure à 6), associée au soulèvement mesuré du dôme apparaissant dans le Caldera, confirma une possibilité d'éruption volcanique. L'U.S. Geological Survey, en s'appuyant sur un ensemble de facteurs signalétiques de risque, publia donc une note officielle sur le « risque volcanique » pour l'ensemble de la zone où est situé le barrage Long Valley.

Les caractéristiques géologiques indiquent que la zone du barrage Long Valley a été et est toujours sujette à de fréquents séismes ayant des origines tectonique et volcanique; en outre, quelques-uns des récents séismes peuvent avoir été associés à une combinaison de processus, à savoir une occlusion du volcan et une intrusion dans des failles existantes avec libération subséquente de contraintes tectoniques le long des failles.

Compte tenu du risque sismique du site, des appareils pour fortes secousses, faisant partie du programme d'auscultation sismique de l'État de Californie, furent installés au barrage Long Valley en 1975 et 1979.

Un enregistreur central CR-1 et trois accélérographes pour fortes secousses du type SMA-1 furent reliés à 22 accéléromètres situés sur le barrage et l'appui rocheux adjacent. La Fig. 7 donne les emplacements de ces appareils.

tilting of the dam crest, since the right abutment dropped 1.7 cm relative to the left abutment. These movements were absorbed mainly by partial opening of the contraction joint between the dam and the left thrust block – the opening was 6 to 10 mm wide and extended from the crest down to a depth of 13.5 m, where it ended in a horizontal lift joint; also a crack in the left thrust block extended 1.5 m along a lift line and then angled down to abutment rock.

No noticeable cracking occurred in the arch dam, as well as relative movement at arch dam-foundation contact. This excellent behaviour attests the considerable strength reserve inherent in the arch structure.

In what concerns appurtenant works, it must be referred slight damage in the spillway intake tower, as well as in the spillway chute; cracking occurred also at four new locations in the concrete lining of the spillway tunnel.

### **3.4. Long Valley Dam**

The Long Valley Dam is a 54 m high zoned embankment dam with a crest length of 180 m. It was constructed across the Owens river in Mono County , California, and completed in 1941.

The dam is only about 5 km south-east of the edge of the Long Valley Caldera and 5 km north-east of surface traces of the Sierra Nevada frontal fault system.

Starting from an earthquake of 5.8 local magnitude in October 1978, the area of the Long Valley Dam has been shaken almost continuously by a low-to-moderate magnitude earthquake sequence (or swarm) until late 1986. This intense earthquake activity, including 26 earthquakes above magnitude 5 and 6 earthquakes above magnitude 6, coupled with measured uplift of the resurgent dome in the Caldera, confirmed a potential for a volcanic eruption. Therefore, the U.S. Geological Survey, based on an accumulation of hazard warning factors, issued a formal “ notice of volcanic hazard ” for the general area in which the Long Valley Dam is located.

The geological evidence indicates that the area of the Long Valley dam has been and is still subject to frequent earthquakes of both tectonic and volcanic origins; moreover, some of the recent earthquakes may have been associated with a combination of processes, namely volcanic stopping and intrusion into existing fault structures with subsequent release of tectonic stress energy along the faults.

Considering the seismic risk of the site, strong motion instruments were installed at the Long Valley dam in 1975 and 1979 as a part of the State of California’s Strong-motion instrumentation program.

One CR-1 and three SMA-1 strong-motion accelerographs were connected to 22 accelerometers, deployed on the Long Valley Dam and adjacent bedrock. The locations of these instruments are shown in Fig. 7.

L'installation des appareils pour fortes secousses en 1975 fut opportune puisque des données précieuses sur de fortes secousses furent recueillies en 1978. Ces données permirent de justifier l'installation de 13 autres accéléromètres en 1979 dans des emplacements appropriés. Bien que les séismes significatifs fussent de magnitude modérée au barrage Long Valley, leur proximité du barrage conduisit à des accélérations de pointe élevées et répétées, à la fois dans le barrage et dans le terrain naturel adjacent (bedrock).

Malgré plusieurs accélérations relativement fortes, les seuls dégâts d'origine sismique observés sur le barrage furent de petites fissures en surface, transversales par rapport à l'axe du barrage, près des appuis; les reconnaissances indiquèrent que la profondeur de ces fissures se limitait à quelques cm. Des éboulements rocheux provenant des versants du canyon et des appuis, au cours de séismes, furent également signalés.

Les enregistrements de fortes secousses lors du séisme du 27 mai 1980 furent utilisés dans une étude destinée à vérifier les méthodes de calcul dynamique concernant l'évaluation de la réponse sismique aux fortes secousses et constituèrent un exemple de référence prouvant que la conception sismique d'un barrage en remblai peut produire un ouvrage sûr avec une réponse vérifiable aux secousses sismiques.

### **3.5. Barrage San Justo**

Le barrage San Justo, en terre zonée, avec un noyau en silt-argile, a une hauteur de 45 m et une longueur en crête de 330 m, et fut achevé en 1987; il est situé à 2,4 km seulement de la faille San Andreas dans le centre-ouest de la Californie, et également près de Calaveras qui est une autre faille très active.

Compte tenu du risque sismique du site, le barrage a été bien équipé d'appareils enregistreurs pour fortes secousses. Douze accéléromètres situés dans et sur le barrage, et également à son pied, sont reliés par câbles à un enregistreur central CR-1 situé sur la crête. Un système autonome à trois composantes est installé sur le parement aval du barrage près de l'appui rive gauche, et un autre sur la digue de retenue.

Le 17 octobre 1989, un séisme de magnitude 7,1 se produisit le long du système de failles San Andreas; il était centré dans les Montagnes Méridionales de Santa Cruz près du belvédère de Loma Prieta, à quelque 50 km du barrage. C'est le plus fort séisme survenu dans le nord de la Californie depuis celui de San Francisco en 1906 (magnitude de 8,3).

L'accélération maximale enregistrée au barrage fut de 0,5 g au centre de la crête. Cette composante de mouvement était horizontale et transversale par rapport à l'axe. Le rapport d'amplification entre les accélérations en crête et au pied était de l'ordre de 2.

Le comportement du barrage fut satisfaisant et aucun dégât décelable ne se produisit.

The timing of strong-motion instrument installation in 1975 was fortuitous since valuable strong-motion data were collected in 1978. These data allowed to justify the installation of another 13 accelerometers in 1979 in convenient locations. Although the significant earthquakes at the Long Valley Dam were of moderate magnitude, their proximity to the dam resulted in repeated and high peak accelerations both in the structure and in adjacent natural ground (bedrock).

Despite several relatively high accelerations, the only earthquake-related damages observed at the Long Valley Dam were minor surface cracks transverse as to the dam axis, near the abutments; however, investigations proved that these cracks were never more than a few cm deep. Rockfalls from the canyon walls and abutments during earthquakes were also reported.

Strong-motion records of May 27, 1980 earthquake were used as a field check in a study to verify calculation methods of dynamic analysis for the evaluation of the seismic response of strong-motions, and provided a benchmark example proving that embankment dam seismic design can produce safe structures with verifiable response to earthquake shaking.

### **3.5. San Justo Dam**

The San Justo Dam is a 45 m high zoned earthfill embankment with a clayey silty core and with a crest length of 330 m, completed in 1987; it is located only 2.4 km far from the San Andreas fault in west-central California and also near Calaveras, which is another highly active fault.

Considering the seismic risk of the site, San Justo has been well instrumented with strong-motion recording equipment. Twelve accelerometers located in, on, and at the toe of the dam are hard-wired to a CR-1 central recorder on the crest. One self contained, three-component system is placed on the downstream face of the dam near the left abutment, and another is on the reservoir dike.

On October 17, 1989 an earthquake of 7.1 magnitude occurred along the San Andreas fault system, centered in the Southern Santa Cruz Mountains near Loma Prieta Lookout, some 50 km far from the dam. This event is the largest earthquake occurred in northern California since the one in San Francisco in 1906 (M 8.3).

The maximum acceleration recorded at the dam was 0.5 g in the center of the dam crest. That component of motion was horizontal and transverse as to the axis. The ratio of amplification between crest and toe accelerations was about 2.

The dam's performance was satisfactory and no detectable damage occurred.

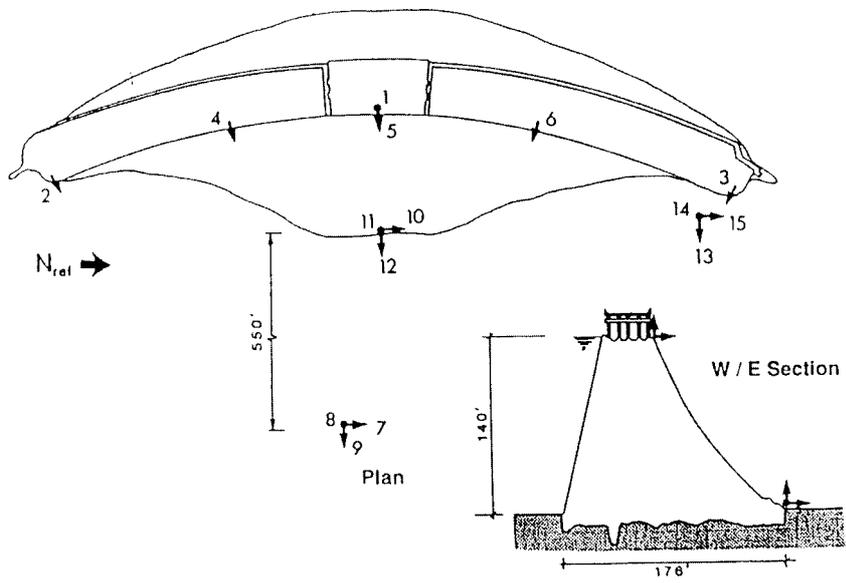


Fig. 5  
 Lower Crystal Springs Dam - Seismic instrumentation  
 Barrage Lower Crystal Springs - Appareils de mesures sismiques

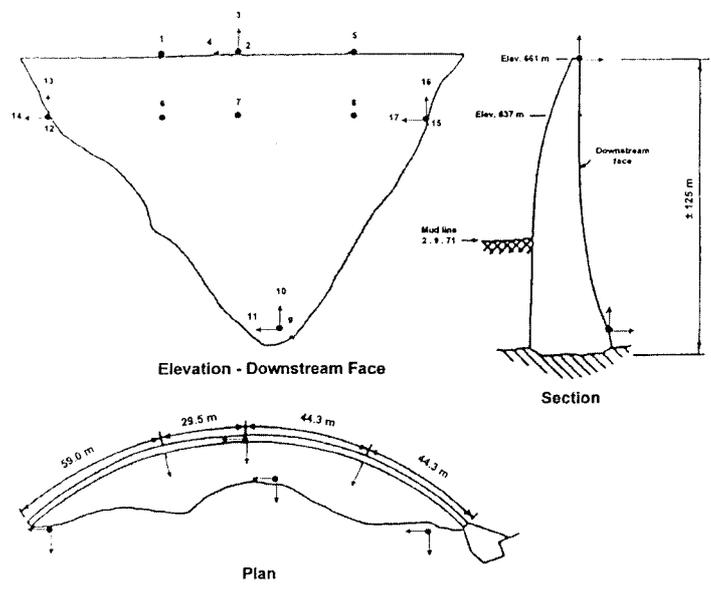


Fig. 6  
 Pacoima Dam - Sensors location  
 Barrage Pacoima - Emplacement des capteurs

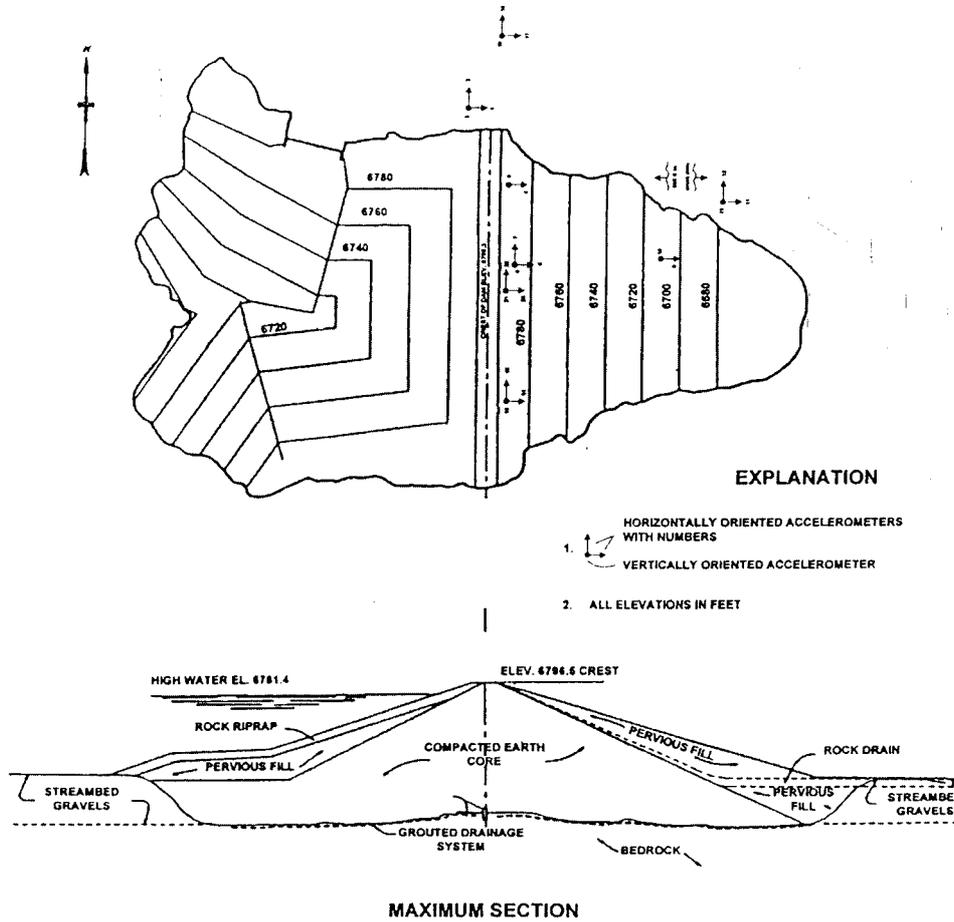


Fig. 7  
 Long Valley Dam - Sensors location  
 Barrage Long Valley - Emplacement des capteurs

**Plan**

1. Horizontally oriented accelerometers with numbers  
 Vertically oriented accelerometer
2. All elevations in feet

**Vue en plan**

1. Accéléromètres de direction horizontale, avec numérotage  
 Accéléromètre de direction verticale
2. Toutes les cotes sont en pieds

**Maximal section**

- Bedrock
- Grouded drainage system
- Streambed gravels
- Compacted earth core
- Pervious fill
- Rock riprap
- Rock drain
- High water el.
- Crest

**Coupe transversale maximale**

- Fond rocheux
- Dispositif d'injection-drainage
- Graviers du lit de la rivière
- Noyau en terre compactée
- Remblai perméable
- Riprap
- Drain en enrochement
- Niveau normal de retenue
- Crête

Imprimerie de Montlignon  
61400 La Chapelle Montlignon  
Dépôt légal : avril 1999  
N° 19336  
ISSN 0534-8293

***Copyright © ICOLD - CIGB***

*Archives informatisées en ligne*  *Computerized Archives on line*

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



---

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