

RESERVOIR LANDSLIDES : INVESTIGATION AND MANAGEMENT

Guidelines and case histories

GLISSEMENTS DE VERSANTS DE RETENUES : RECONNAISSANCES, ÉTUDES ET GESTION

Recommandations et exemples

Bulletin 124



RESERVOIR LANDSLIDES : INVESTIGATION AND MANAGEMENT
GLISSEMENTS DE VERSANTS DE RETENUES : RECONNAISSANCES, ÉTUDES ET GESTION



INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
151, boulevard Haussmann - 75008 Paris - France
Téléphone : (33) 01 53 75 16 52 - Fax : (33) 01 40 42 60 71
<http://www.icold-cigb.org/>

124



2000

AVERTISSEMENT – EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ :

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.

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.

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

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

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

Original text in English
French translation by Y. Le May

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

RESERVOIR LANDSLIDES : INVESTIGATION AND MANAGEMENT

Guidelines and case histories

GLISSEMENTS DE VERSANTS DE RETENUES : RECONNAISSANCES, ÉTUDES ET GESTION

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 - Site : www.icold-cigb.org

COMMITTEE ON RESERVOIR SLOPE STABILITY
COMITÉ DE LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES
(1993-2000)

Chairman/Président

New Zealand/Nouvelle-Zélande M. GILLON

Vice Chairman/Vice-Président

Luxemburg/Luxembourg W. RIEMER

Members/Membres

Austria/Autriche H. SCHWAB
Brazil/Brésil V. DE MELLO
Canada/Canada D. MOORE
China/Chine Zhuoyan ZHANG
Costa Rica/Costa Rica L. LLACH (1)
S. MORA CASTRO (2)
France/France P. DUFFAUT (3)
J-Y DUBIE (4)
Germany/Allemagne K. JOHN (3)
L.D. SCHEWE (5)
Iran/Iran A. MAHIN (6)
S. LITKOUHI (5)
Italy/Italie A. MARCELLO
Japan/Japon Y. TAKEMURA (7)
H. MORIMOTO (5)
Korea/Corée S.W. HONG (8)
S. KIM (6)
Spain/Espagne C. SAENZ
Switzerland/Suisse A. HUBER
U S A /États-Unis P. MOTE (9)
P.A. JARAMILLO (7)
P. HARDING (5)

(1) Member until /Membre jusqu'en 1994
(2) Member since /Membre depuis 1994
(3) Member until /Membre jusqu'en 1997
(4) Member since /Membre depuis 1997
(5) Member since /Membre depuis 1999

(6) Member since /Membre depuis 1998
(7) Member since /Membre depuis 1996
(8) Member until /Membre jusqu'en 1998
(9) Member until /Membre jusqu'en 1996

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

RÉSUMÉ

1. INTRODUCTION
2. EXPÉRIENCE INTERNATIONALE
3. PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES
4. GESTION DES PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES
5. RECONNAISSANCES ET ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES
6. ÉTUDE ET CALCUL DES VERSANTS
7. ONDES DE TRANSLATION ET OBSTRUCTION DE LA VALLÉE
8. GESTION DES RISQUES
9. ATTÉNUATION DES RISQUES
10. AUSCULTATION
11. SURVEILLANCE REQUISE EN COURS D'EXPLOITATION
12. RÉFÉRENCES

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

EXECUTIVE SUMMARY

1. INTRODUCTION
2. INTERNATIONAL EXPERIENCE
3. RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES
4. MANAGING RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES
5. GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION
6. SLOPE ASSESSMENT AND ANALYSIS
7. IMPULSE WAVES AND VALLEY BLOCKAGE
8. RISK MANAGEMENT
9. RISK MITIGATION
10. MONITORING
11. OPERATIONAL REQUIREMENTS
12. REFERENCES

APPENDICES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	16
RÉSUMÉ	18
1. INTRODUCTION	22
1.1. Sujet traité	22
1.2. Objectifs	22
1.3. En quoi les versants de retenues diffèrent-ils ?	22
1.4. Aspects-clés de gestion	24
1.5. Définitions	26
2. EXPÉRIENCE INTERNATIONALE	28
2.1. Domaine des problèmes rencontrés	28
2.2. Époques où se produisent des glissements de terrain	30
2.3. Réponses au questionnaire de la CIGB	32
2.4. Leçons-clés tirées des exemples choisis	36
2.4.1. Glissement de Vaiont, Italie	38
2.4.2. Glissement n° 5 de Tablachaca, Pérou	38
2.4.3. Arête Dutchmans, Canada	40
2.4.4. Gorge de Cromwell – Aménagement hydroélectrique de Clyde, Nouvelle-Zélande	42
3. PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES	46
3.1. Champ de considérations	46
3.2. Effets de la retenue	48
3.3. Conséquences possibles de l'instabilité de versants	50
4. GESTION DES PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES	54
4.1. Le processus	56
4.2. Classement par ordre de priorité	62
4.3. Problèmes de gestion des risques d'instabilité de versants de retenues	64
4.3.1. Prise en compte d'un risque d'instabilité de versant	64
4.3.2. Personnel	68
4.3.3. Incertitudes	70
4.3.4. Opérations de contrôle	70

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	17
EXECUTIVE SUMMARY	19
1. INTRODUCTION	23
1.1. Subject	23
1.2. Objectives.....	23
1.3. How are reservoir slopes different ?	23
1.4. Key management issues.....	25
1.5. Definitions.....	27
2. INTERNATIONAL EXPERIENCE.....	29
2.1. Range of problems encountered	29
2.2. Timing of landslide events.....	31
2.3. ICOLD questionnaire response	33
2.4. Key lessons from selected case histories	37
2.4.1. Vaiont Slide, Italy.....	39
2.4.2. Tablachaca Slide No. 5, Peru.....	39
2.4.3. Dutchmans Ridge, Canada.....	41
2.4.4. Cromwell Gorge - Clyde Power Project, New Zealand.....	43
3. RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES	47
3.1. Range of considerations	47
3.2. Effects of the reservoir	49
3.3. Potential consequences of slope instability.....	51
4. MANAGING RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES	55
4.1. The process	57
4.2. Prioritisation	63
4.3. Project management issues	65
4.3.1. Including a slope risk perspective.....	65
4.3.2. Personnel	69
4.3.3. Uncertainty.....	71
4.3.4. Review	71

4.3.5. Archives	70
4.3.6. Gestion à long terme	72
5. RECONNAISSANCES ET ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES	74
5.1. Activités suggérées dans diverses phases	76
5.1.1. Phase de pré faisabilité	76
5.1.2. Phase de faisabilité	76
5.1.3. Phases de projet	78
5.1.4. Phase de construction.....	84
5.2. Auscultation et dispositifs de mesure	84
5.3. Études sismiques	88
6. ÉTUDE ET CALCUL DES VERSANTS.....	92
6.1. Modèle de versant	92
6.1.1. Types de rupture de versant	92
6.1.2. Développement d'un modèle de versant	92
6.1.3. Considérations analytiques.....	96
6.2. Modèles analytiques.....	98
6.3. Mise au point du modèle	100
6.3.1. Paramètres de résistance	100
6.3.2. Modèle hydrogéologique	102
6.3.3. Facteurs climatiques	104
6.3.4. Vidange rapide	106
6.3.5. Stabilité sismique	106
6.3.6. Distance et vitesse de déplacement	106
6.3.7. Séquence analytique.....	108
6.4. Résultats	110
6.5. Vérification du modèle	110
7. ONDES DE TRANSLATION ET OBSTRUCTION DE LA VALLÉE.	114
7.1. Ondes de translation	114
7.1.1. Exemples historiques d'ondes de translation	116
7.1.2. Estimation des hauteurs des ondes de translation possibles	116
7.1.3. Déferlement de l'onde	120
7.1.4. Déversement sur le barrage	120

4.3.5. Records	71
4.3.6. Long-term management	73
5. GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION.....	75
5.1. Suggested activities in various phases.....	77
5.1.1. Pre-feasibility phase	77
5.1.2. Feasibility phase.....	77
5.1.3. Design phases.....	79
5.1.4. Construction phase	85
5.2. Instrumentation and monitoring	85
5.3. Seismicity studies.....	89
6. SLOPE ASSESSMENT AND ANALYSIS.....	93
6.1. Slope model.....	93
6.1.1. Types of slope failure	93
6.1.2. Development of a slope model	93
6.1.3. Analytical considerations	97
6.2. Analytical models.....	99
6.3. Model development	101
6.3.1. Strength parameters	101
6.3.2. Hydrogeological model.....	103
6.3.3. Climatic factors	105
6.3.4. Rapid drawdown.....	107
6.3.5. Seismic stability.....	107
6.3.6. Travel distance and velocity	107
6.3.7. Analytical sequence.....	109
6.4. Outcomes	111
6.5. Model verification	111
7. IMPULSE WAVES AND VALLEY BLOCKAGE.....	115
7.1. Impulse waves.....	115
7.1.1. Historical examples of impulse waves.....	117
7.1.2. Estimating potential impulse wave height.....	117
7.1.3. Wave runup	121
7.1.4. Dam overtopping.....	121

7.2. Obstruction de la vallée.....	120
7.2.1. Conséquences de la création de barrages par des glissements de terrain	122
7.2.2. Mesures de protection concernant des barrages créés par des glissements de terrain.....	122
7.3. Ruptures de versants de neige et de glace.....	124
8. GESTION DES RISQUES	128
8.1. Identification des risques.....	128
8.2. Analyse des risques.....	130
8.3. Évaluation des risques	132
8.4. Traitement des risques.....	138
9. ATTÉNUATION DES RISQUES	140
9.1. Projet de la retenue et du barrage.....	140
9.2. Méthode des observations.....	144
9.3. Méthodes de stabilisation.....	146
9.3.1. Modification de géométrie du versant	150
9.3.2. Drainage et protection contre les infiltrations	154
9.3.3. Ouvrages de soutènement	158
9.3.4. Renforcement interne de versants.....	160
9.3.5. Autres mesures de stabilisation	160
9.4. Restrictions apportées à l'exploitation de la retenue	162
9.4.1. Mise en eau de la retenue	162
9.4.2. Exploitation.....	164
9.5. Restrictions apportées à l'utilisation des sols	166
10. AUSCULTATION.....	172
10.1. Bienfaits de l'auscultation	172
10.2. Auscultation d'investigation	172
10.3. Auscultation de prévision.....	176
10.4. Fiabilité des données.....	178
10.4.1. Convenance des dispositifs d'auscultation	178
10.4.2. Fréquence d'auscultation	180
10.4.3. Utilisation de systèmes SAAD	180
10.4.4. Fiabilité des systèmes.....	182
10.4.5. Collecte et traitement des données	182
10.4.6. Choix des critères d'alarme	184

7.2. Valley blockage	121
7.2.1. Consequences of landslide dams	123
7.2.2. Remediation of landslide dams.....	123
7.3. Snow and ice slope failures	125
8. RISK MANAGEMENT	129
8.1. Risk identification	129
8.2. Risk analysis.....	131
8.3. Risk assessment	133
8.4. Risk treatment	139
9. RISK MITIGATION	141
9.1. Reservoir and dam design	141
9.2. The observational method	145
9.3. Stabilisation methods.....	147
9.3.1. Modification of slope geometry	151
9.3.2. Drainage and infiltration protection	155
9.3.3. Retaining structures	159
9.3.4. Internal slope reinforcement.....	161
9.3.5. Other stabilisation measures	161
9.4. Restrictions to reservoir operations.....	163
9.4.1. Lake filling.....	163
9.4.2. Operations	165
9.5. Restrictions to land use	167
10. MONITORING	173
10.1. Benefit of monitoring	173
10.2. Investigative monitoring.....	173
10.3. Predictive monitoring	177
10.4. Reliability of data	179
10.4.1. Sufficiency of instrumentation.....	179
10.4.2. Monitoring frequency	181
10.4.3. Using ADAS systems.....	181
10.4.4. System reliability	183
10.4.5. Data collection and processing	183
10.4.6. Selection of alarm criteria	185

11. SURVEILLANCE REQUISE EN COURS D'EXPLOITATION	188
11.1. Généralités	188
11.2. Exploitation et entretien des systèmes de surveillance	188
11.2.1. Exploitation.....	188
11.2.2. Entretien.....	190
11.3. Surveillance et maintenance des mesures correctives	190
11.4. Examens techniques.....	192
11.5. Plans d'alerte.....	194
 12. RÉFÉRENCES.....	 198
 ANNEXES (*)	 207
Annexe A : Exemples choisis	209
A-1 : Glissement de Vaiont, Italie.....	210
A-2 : Glissement n°5 de Tablachaca, Pérou.....	216
A-3 : Arête Dutchmans, Canada.....	222
A-4 : Gorge de Cromwell – Aménagement hydroélectrique de Clyde, Nouvelle-Zélande	227
Annexe B : Questions à poser au cours des reconnaissances et études des glissements de versants de retenues	233
Annexe C : Listes de contrôle pour les reconnaissances et études des glissements de versants de retenues	237
Annexe D : Recommandations japonaises pour le classement par ordre de priorité des reconnaissances et études des glissements de versants de retenues.....	241

(*) En anglais seulement

11. OPERATIONAL REQUIREMENTS.....	189
11.1. General.....	189
11.2. Operation and maintenance of surveillance systems.....	189
11.2.1. Operation.....	189
11.2.2. Maintenance.....	191
11.3. Operation and maintenance of remedial measures.....	191
11.4. Technical reviews.....	193
11.5. Emergency preparedness.....	195
12. REFERENCES.....	198
APPENDICES (*).....	207
Appendix A : Selected case histories.....	209
A-1 : Vaiont Slide, Italy.....	210
A-2 : Tablachacha Slide No 5, Peru.....	216
A-3 : Dutchmans Ridge, Canada.....	222
A-4 : Cromwell Gorge Landslides, New Zealand.....	227
Appendix B : Questions to ask for during reservoir landslide investigations....	233
Appendix C : Checklists for reservoir landslide investigations.....	237
Appendix D : Japanese guidelines for prioritising reservoir landslide investigations.....	241

(*) In English only

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Types de glissements de terrain identifiés
- Fig. 2 Époques où les glissements de terrain furent identifiés pour la première fois
- Fig. 3 Effets potentiels des glissements de terrain
- Fig. 4 Types de travaux de confortement exécutés
- Fig. 5 Méthodes d'auscultation utilisées
- Fig. 6 Effets possibles des variations du niveau de retenue sur les niveaux piézométriques
- Fig. 7 Processus d'étude et d'évaluation de la stabilité de versants
- Fig. 8 Caractéristiques des étapes de développement du projet et des études des versants de la retenue
- Fig. 9 Types de rupture de versant
- Fig. 10 Vues schématiques, en plan et en coupe, d'un glissement, avec indication des paramètres principaux utilisés dans la description des ondes de translation
- Fig. 11 Critères de risques sociétaux modifiés, proposés par l'ANCOLD
- Fig. 12 Matrice de classement qualitatif des risques
- Fig. 13 Stabilisation au moyen d'une risberme de pied
- Fig. 14 Stabilisation par déchargement dans la partie supérieure
- Fig. 15 Stabilisation par galeries et forages de drainage
-
- Fig. A1-1 Emplacement de la retenue de Vaiont (Italie)
- Fig. A1-2 Coupe transversale du glissement de Vaiont, avant la rupture
- Fig. A1-3 Coupe transversale du glissement de Vaiont, après la rupture
- Fig. A1-4 Glissement de Vaiont – Comparaison des niveaux de retenue, des mouvements du glissement et des hauteurs de pluie, au cours de la période 1960-1963
- Fig. A2-1 Emplacement de la retenue de Tablachaca (Pérou)
- Fig. A2-2 Coupe géologique simplifiée du glissement n° 5 de Tablachaca
- Fig. A2-3 Retenue de Tablachaca – Vue d'ensemble des ouvrages de stabilisation
- Fig. A2-4 Retenue de Tablachaca – Coupe transversale montrant les ouvrages de stabilisation

LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Types of landslide identified
- Fig. 2 Time landslides first identified
- Fig. 3 Potential effects of landslides
- Fig. 4 Types of remedial works carried out
- Fig. 5 Monitoring methods used
- Fig. 6 Possible effects of reservoir water level changes on piezometric levels
- Fig. 7 Slope stability investigation and assessment process
- Fig. 8 Typical project stages and reservoir slope studies
- Fig. 9 Types of slope failure
- Fig. 10 Slide layout and section with the main parameters of an impulse wave
- Fig. 11 Proposed ANCOLD amended interim societal criteria
- Fig. 12 Qualitative risk prioritisation matrix
- Fig. 13 Stabilisation using a toe berm
- Fig. 14 Stabilisation by head unloading
- Fig. 15 Stabilisation by drainage tunnels and drainholes
- Fig. A1-1 Location of Vaiont reservoir (Italy)
- Fig. A1-2 Cross section through Vaiont Slide prior to failure
- Fig. A1-3 Cross section through Vaiont Slide after failure
- Fig. A1-4 Vaiont Slide – Comparison of water levels, slide movements and rainfall 1960-1963
- Fig. A2-1 Location of Tablachaca reservoir (Peru)
- Fig. A2-2 Simplified geological section through the Tablachaca Slide No. 5
- Fig. A2-3 Tablachaca reservoir – Overview of emergency works
- Fig. A2-4 Tablachaca reservoir – Cross section showing stabilisation works

- Fig. A2-5 Glissement n°5 de Tablachaca – Déplacements en surface (période 1980-1985)
- Fig. A3-1 Arête Dutchmans (Canada) – Dispositions générales du système de drainage, avec lignes de niveau indiquant la baisse des niveaux d'eau
- Fig. A3-2 Arête Dutchmans – Coupe transversale indiquant les niveaux d'eau avant le drainage et après le drainage, au-dessus et au-dessous de la faille sous-jacente
- Fig. A3-3 Arête Dutchmans – Mouvements enregistrés dans la zone de la faille sous-jacente
- Fig. A4-1 Emplacement du barrage de Clyde et des glissements de terrain dans la gorge de Cromwell (Nouvelle-Zélande)
- Fig. A4-2 Coupe transversale du glissement de Jackson Creek (Nouvelle-Zélande), montrant les mesures de stabilisation

- Fig. A2-5 Tablachaca Slide No. 5 – Surface displacement data 1980-1985
- Fig. A3-1 Dutchmans Ridge (Canada) – Drainage system layout with contours showing reduction in water levels
- Fig. A3-2 Dutchmans Ridge – Cross section showing water levels before drainage and post-drainage levels above and below the Basal Fault
- Fig. A3-3 Dutchmans Ridge – Movements recorded at the Basal Fault Zone
- Fig. A4-1 Location of Clyde dam and Cromwell Gorge landslides (New Zealand)
- Fig. A4-2 Cross section of Jackson Creek Slide showing stabilisation works (New Zealand)

AVANT-PROPOS

En 1993, la CIGB a constitué un Comité ad hoc pour traiter de la « Stabilité des Versants de Retenues ». Ce Comité avait pour mission d'entreprendre une étude approfondie de l'interaction entre les versants et l'eau stockée, sachant que les ruptures de versants de retenues ont des effets potentiellement plus importants que ceux résultant d'autres ruptures de versants, du fait des dégâts susceptibles d'être causés par les ondes de translation.

Les principales tâches du Comité étaient les suivantes : examen des problèmes d'instabilité de versants rencontrés sur le plan international, et élaboration de recommandations relatives à l'identification et à l'évaluation des dangers d'instabilité de versants de retenues, et à la gestion des risques associés.

Le Comité comprenait des membres provenant de pays confrontés à des problèmes d'instabilité de versants de retenues, des professionnels expérimentés dans les domaines de l'analyse et de la gestion de ces problèmes, et des représentants d'instituts de recherches, de l'administration et de services publics. Les travaux du Comité ont porté sur les aspects techniques, géologiques, géotechniques, hydrogéologiques, hydrauliques et de sécurité de barrage. Les listes de références contenues dans le Bulletin donnent les informations disponibles jusqu'à décembre 1999.

Les membres du Comité ayant collaboré à la préparation du Bulletin sont : M. Gillon (Nouvelle-Zélande, Président), W. Riemer (Luxembourg, Vice-Président), E. Cifres (Espagne), V. de Mello (Brésil), J-Y Dubie (France), P. Duffaut (France), S-W Hong (Corée), A. Huber (Suisse), P. Harding (États-Unis), K. John (Allemagne), P. Mote (États-Unis), A. Marcello (Italie), D. Moore (Canada), H. Morimoto (Japon), H. Schwab (Autriche), Y. Takemura (Japon), Zhuoyan Zhang (Chine).

En outre, M.M. P. Foster et D. Macfarlane (Nouvelle-Zélande) ont fourni de précieuses contributions à la préparation du Bulletin. Electricity Corporation of New Zealand a apporté un soutien financier au Président.

M. Gillon
Président du Comité ad hoc
de la Stabilité des Versants de Retenues

FOREWORD

In 1993, ICOLD appointed an ad hoc Committee to deal with “ Reservoir Slope Stability ”. The Committee's Terms of Reference were to undertake a comprehensive study of the interaction between slopes and impounded water, recognising that slope failures into reservoirs have potentially greater impacts than other slope failures because they may create damaging impulse waves.

The Committee's main tasks were to study the international extent of reservoir slope stability problems, and to develop guidelines for the identification and evaluation of slope stability hazards to reservoirs, and for management of the associated risks.

The Committee consisted of members from countries with reservoir slope stability problems, professionals experienced in their analysis and treatment, and representatives of research institutes, public authorities and utilities. Committee expertise covered engineering, geological, geotechnical, hydrogeological, hydraulic and dam safety specialties. The Bulletin references published information available up to December 1999.

Contributing members of the Committee during its term were : M. Gillon (New Zealand, Chairman), W. Riemer (Luxemburg, Deputy Chairman), E. Cifres (Spain), V. de Mello (Brazil), J-Y Dubie (France), P. Duffaut (France), S-W Hong (Korea), A. Huber (Switzerland), P. Harding (USA), K. John (Germany), P. Mote (USA), A. Marcello (Italy), D. Moore (Canada), H. Morimoto (Japan), H. Schwab (Austria), Y. Takemura (Japan), Zhuoyan Zhang (China).

In addition, Messrs. P. Foster and D. Macfarlane of New Zealand made major contributions to the text of the Bulletin. The Electricity Corporation of New Zealand provided financial support to the Chairman.

M. Gillon
Chairman, ad hoc Committee
on Reservoir Slope Stability

RÉSUMÉ

La création d'une retenue contre un versant instable ou potentiellement instable peut affecter sa stabilité et accroître les conséquences d'une rupture. Au cours du remplissage de la retenue ou lorsque celle-ci est pleine, le risque augmente par suite de la présence d'une masse d'eau dans la vallée. Si la rupture est rapide, des ondes de translation ou des ondes de crue résultant du glissement de terrain dans la retenue peuvent déverser sur le barrage et l'endommager, les effets de ces ondes pouvant s'étendre au-delà des confins de la retenue. La sécurité publique est susceptible d'être mise en danger sur une vaste zone adjacente à la retenue et à l'aval de celle-ci.

L'objectif principal de la gestion des versants de retenues est de s'assurer que les versants adjacents à une retenue sont suffisamment stables pour permettre le remplissage et l'exploitation de celle-ci, en évitant des impacts environnementaux nuisibles et des pertes économiques ou de vies humaines. Les processus de gestion des risques contribuent beaucoup à atteindre cet objectif.

Des versants existants, de stabilité limite, peuvent présenter un danger après la formation d'une retenue, même si des ouvrages de stabilisation ont été réalisés. Des changements relativement faibles dans la stabilité altèrent parfois, de façon significative, la probabilité de rupture d'un versant. La vitesse du mouvement d'un versant peut être sensible à de faibles variations du coefficient de sécurité. Le changement de vitesse de mouvement est souvent le paramètre-clé pour évaluer la sûreté de comportement ou pour se tenir en éveil vis-à-vis de la possibilité d'une rupture rapide.

Les problèmes d'instabilité de versants autour d'une retenue augmentent le coût du projet et peuvent retarder la mise en service ou même affecter la viabilité de l'ensemble de l'aménagement. L'engagement de fonds dans des reconnaissances et études approfondies et bien programmées permettront de connaître et d'évaluer les problèmes potentiels suffisamment tôt. Les conséquences possibles d'une rupture peuvent ainsi être évaluées et, si nécessaire, des solutions d'atténuation étudiées avant d'effectuer d'importants engagements financiers.

Les enquêtes et études faites par le Comité indiquent que 36 % des glissements de terrain signalés sur des versants de retenues ont été identifiés au cours de la phase des reconnaissances du projet. La plupart des glissements sont identifiés au cours des phases ultérieures du projet. Les problèmes de glissement rencontrés pendant la construction ou l'exploitation d'un aménagement peuvent conduire à de lourdes dépenses non budgétisées et nuire à l'économie de l'aménagement.

Selon les enquêtes et études, des glissements de terrain préexistants sont à l'origine de la plus grande partie des problèmes rencontrés par les maîtres d'ouvrage, et 75 % au moins des glissements de versants de retenues connus ont résulté d'accidents de terrain préexistants.

De nombreux cas de grands glissements de versants de retenues ont été signalés. Lorsque ces glissements nécessitent une stabilisation, les solutions les moins coûteuses sont souvent des mesures de drainage et de protection contre les infiltrations, et/ou des risbermes de butée de pied.

EXECUTIVE SUMMARY

Creation of a reservoir against an unstable or potentially unstable slope may both affect its stability and increase the consequences of failure. With the reservoir full, or being filled, the risk increases from that of slope failure into a valley to that of failure into a body of water. In the event of rapid failure, impulse waves or flood waves from reservoir landslides may overtop and damage the dam, and can have effects that extend beyond the confines of the reservoir. This can endanger public safety over a large area adjacent to the reservoir and downstream from it.

The key objective of reservoir slope management is to ensure that the slopes adjacent to a reservoir are sufficiently safe to enable it to be filled and operated while avoiding adverse environmental impacts and economic losses or loss of life. Risk management processes are an important aid to achieving this objective.

Existing slopes of marginal stability may pose a hazard after reservoir formation, even if stabilisation works are installed. Relatively small changes in stability can significantly alter the likelihood of slope failure. The velocity of the slope movement may be sensitive to small changes in the factor of safety. Change in the rate of movement is often the key parameter for assessing safe performance or alerting to the possibility of rapid failure.

Instability problems for slopes around a reservoir increase project costs, and can delay commissioning or even affect the viability of the entire project. Investing in thorough, well planned investigations will ensure that potential problems are recognised and evaluated early. The possible consequences of failure can then be evaluated and, where necessary, mitigation options can be assessed before major commitments are made.

Surveys by the Committee indicate that historically, about 36 % of reservoir landslides have been identified during the project investigation phase. Most landslides are identified during later stages of the project. Landslide problems encountered during project construction or operation may require large, unbudgeted expenditure and adversely affect the economics of the project.

According to the surveys, pre-existing landslides cause the most problems for reservoir owners, and at least 75 % of known reservoir landslides were actually pre-existing features.

Many cases of very large reservoir landslides have been reported. Where these slides require stabilisation, the most cost-effective solutions are often drainage and infiltration protection measures and/or toe berms.

Dans toute évaluation, il est nécessaire de considérer la stabilité de l'ensemble du versant ainsi que des zones particulières du glissement. Les facteurs contribuant à l'instabilité doivent être identifiés. Cette approche vise à obtenir le traitement le plus bénéfique, au moindre coût. Souvent, une amélioration importante de stabilité peut résulter du traitement d'une partie relativement petite du versant.

Après formation de la retenue, les moyens-clés destinés à confirmer que des marges de sécurité acceptables se maintiennent sont les résultats d'auscultation et les observations visuelles. Dans le cas de retenues susceptibles de connaître des glissements de terrain potentiellement catastrophiques, il est recommandé de procéder à des examens techniques du comportement des versants aussi longtemps que la démonstration de conditions d'amélioration permanente le nécessitera, cela peut-être pendant toute la durée de vie de l'aménagement.

Les incidents associés aux glissements de terrain surviennent le plus souvent au cours du remplissage de retenues ou des premières années de leur exploitation. Toutefois, les conditions de chargement les plus sévères, résultant d'événements naturels extrêmes, tels que des séismes ou des chutes de pluie d'intensité ou de durée exceptionnelle, peuvent survenir bien des années après la formation de la retenue. Un développement des activités autour de la retenue peut également accroître, dans le temps, les conséquences d'une rupture de versant. Le contrôle de la stabilité d'un versant de retenue doit donc faire partie du programme de contrôle à long terme du barrage et de la retenue.

In any evaluation, it is necessary to consider the stability of both the whole slope and the individual parts of the landslide. Factors contributing to instability must be identified. This approach allows treatment to be targeted to gain the required benefit at least cost. Often, a significant increase in stability may be obtained from treatment of a relatively small part of the slope.

After formation of the reservoir, the key tools for confirming that acceptable safety margins are maintained are monitoring data and visual observations. For reservoirs with potentially catastrophic landslides, it is advisable to provide for technical review of the performance of reservoir slopes for as long as it takes to demonstrate a condition of permanent improvement, perhaps throughout the lifetime of the project.

Incidents related to landslides most commonly occur during lake filling and the initial years of reservoir operation. However, the most severe loading conditions, associated with extreme natural events such as earthquakes or rainfall of abnormal intensity or duration, may not occur until years after formation of the reservoir. Also, additional development around the reservoir may increase the consequences of reservoir slope failure over time. Reservoir slope stability must therefore be part of the long-term safety plan for the reservoir and dam.

1. INTRODUCTION

1.1. SUJET TRAITÉ

Le Bulletin examine la relation entre les retenues et la stabilité de leurs versants, ainsi que les effets directs et indirects de versants instables sur les retenues et leur exploitation. Bien que l'accent soit mis sur les mouvements dans les sols, et les roches, la large définition de versants instables inclut également, par exemple, les avalanches de neige, les chutes de glace et les coulées de détrit. Cependant, les problèmes de stabilité de neige, de glace et de détrit ne sont pas traités en détail dans le Bulletin.

Le Bulletin vise à informer les agences de développement, le personnel technique, les maîtres d'ouvrage/exploitants et les organismes publics concernés par les retenues, des divers problèmes de danger et de risque pouvant résulter de glissements de versants. Il s'efforce de donner des recommandations aux services chargés de projets de retenues et aux maîtres d'ouvrage, sur les moyens d'identifier, de traiter et de contrôler les risques de glissement de versants de retenues.

Les concepts et recommandations présentés dans le Bulletin seront particulièrement importants pour les projets de retenues au stade de leur étude, et pour l'évaluation de la sécurité de barrages existants et de leurs retenues. Ils s'appliquent aussi aux instabilités de pente le long des rives lacustres et des rivages maritimes.

1.2. OBJECTIFS

L'objectif principal du Bulletin est de présenter des techniques et pratiques de gestion des problèmes de versants de retenues en vue d'apporter une aide :

- Dans l'identification et l'analyse satisfaisantes, et en temps opportun, des dangers associés aux versants,
- Dans la préservation de la sécurité publique qui peut être affectée par des glissements de versants de retenues,
- Dans la gestion des risques, sur le plan économique, concernant les versants de retenues au cours de leur construction et de leur exploitation.

Un autre objectif est de souligner les aspects spécifiques de l'évaluation de la stabilité et de la sécurité des versants de retenues, afin que les études soient effectuées par un personnel compétent et soient bien orientées.

1.3. EN QUOI LES VERSANTS DE RETENUES DIFFÈRENT-ILS ?

Les glissements de terrain constituent un danger naturel courant. Les versants de retenues sont identiques à d'autres versants sous de nombreux aspects, et

1. INTRODUCTION

1.1. SUBJECT

This Bulletin examines the relationship between reservoirs and slope stability, and the direct and indirect effects of unstable slopes on reservoirs and their operation. Although the emphasis is on movements in soil and rock, the wide definition of unstable slopes also includes, for instance, ice and snow avalanches, and lahars. However, ice, snow and lahar stability problems are not treated in detail in this Bulletin.

The Bulletin aims to inform development agencies, technical personnel, owners/operators and government institutions involved with reservoirs about the range of hazards and risks which may result from landslides. It endeavours to give guidance to the developers and owners of reservoir projects on how reservoir landslide risks can be identified, treated and managed to control risks.

Concepts presented here are particularly important to reservoir projects in the planning stage, and to the safety evaluation of existing dams and their reservoirs. They are also relevant to slope instability along lakeshores and coastlines.

1.2. OBJECTIVES

The primary objective of this Bulletin is to introduce management practices and techniques for reservoir slopes to assist in:

- The proper and timely identification and analysis of slope-related hazards,
- The preservation of public safety, which could be affected by reservoir landslides,
- The management of the economic risks related to reservoir slopes during construction and operation.

Another objective is to highlight unique aspects of reservoir slope stability and safety assessment so that studies can be properly staffed and directed.

1.3. HOW ARE RESERVOIR SLOPES DIFFERENT ?

Landslides are a common natural hazard. Reservoir slopes are similar to other slopes in many ways and the extensive technical literature on the topics of landslide

l'abondante documentation technique sur les reconnaissances, la stabilisation et l'auscultation des glissements de terrain est généralement applicable. Cependant, il y a d'importants facteurs spécifiques aux retenues, dont on doit tenir compte. Deux des aspects les plus importants sont : l'effet de la retenue sur la stabilité des versants et les effets du glissement de terrain sur la retenue. En particulier :

1. Les versants d'une retenue sont soumis à des variations de charge résultant du remplissage et, par la suite, des variations du niveau de retenue en cours d'exploitation.
2. La retenue peut affecter les propriétés des matériaux des versants et conduire à des conditions de nappe phréatique plus défavorables que celles existant précédemment à l'intérieur des versants, ce qui crée des modifications pouvant entraîner une instabilité.
3. La retenue peut accroître la probabilité de rupture et ses conséquences pouvant inclure :
 - Une obstruction totale ou partielle de la retenue,
 - La possibilité de formation d'ondes de translation causant des dégâts, en cas de chute rapide d'un volume important de matériaux dans la retenue,
 - Un impact direct sur le barrage ou ses ouvrages annexes.
4. Dans le cas d'une rupture rapide, les ondes de translation ou les ondes de crue résultant du glissement de terrain dans la retenue peuvent avoir des effets s'étendant au delà des limites de celle-ci.

1.4. ASPECTS-CLÉS DE GESTION

La responsabilité des dégâts résultant de l'instabilité des versants d'une retenue incombera souvent au maître d'ouvrage ou à l'agence de développement de la retenue. Par contre, l'instabilité de versants naturels sera souvent considérée comme « un cas de force majeure ». Un certain nombre d'aspects importants sont à prendre en considération par les maîtres d'ouvrage et les agences de développement.

1. Dans de nombreux cas bien documentés, un glissement de terrain fut identifié, mais le danger et le risque ne furent pas estimés correctement et suffisamment tôt lors du projet. Si l'importance des glissements de terrain n'est pas bien appréciée avant la construction, ils peuvent conduire à l'abandon de l'aménagement, ou à des retards dans la mise en service lorsque des travaux de confortement sont entrepris.
2. Bien que la plus grande partie des investissements et des travaux de construction se concentrent généralement sur le barrage et ses ouvrages annexes, la retenue et son exploitation sont des éléments-clés de la plupart des aménagements hydrauliques comprenant des retenues.
3. Pour les projets de retenues, les dangers d'instabilité de versants doivent être évalués au même degré que les dangers de crues et de séismes, et doivent être inclus dans les programmes de sécurité de barrages concernant le long terme.
4. La valeur d'investissement d'un aménagement de retenue peut être sérieusement affectée ou complètement perdue par suite d'une mauvaise

investigation, stabilisation and monitoring is generally applicable. However, there are important reservoir-specific factors that must be taken into account. Two of the most important issues are the effect of the reservoir itself on slope stability, and the effects of the landslide on the reservoir. Particular considerations include :

1. Reservoir slopes are subject to load changes as a result of inundation when the reservoir is filled, and subsequently as a result of variations in lake level during operations.
2. The reservoir may affect slope material properties and generate more adverse groundwater conditions than previously existed within the slope, creating reservoir-specific changes that can lead to instability.
3. The reservoir can increase the probability and consequences of failure, which may include :
 - Total or partial blockage of the reservoir,
 - The possibility of damaging impulse waves being generated in the event of rapid failure of large volumes of material into the reservoir,
 - Direct impact on the dam or ancillary structures.
4. In the event of rapid failure, impulse waves or flood waves from reservoir landslides can have effects that extend beyond the reservoir.

1.4. KEY MANAGEMENT ISSUES

Responsibility for damage resulting from reservoir slope instability will often reside with the owners or developers of the reservoir. In contrast, the instability of natural slopes will often be attributed to “ an act of God ”. There are some important considerations for owners and developers.

1. In many well-documented cases, a landslide was recognised but the hazard and risk were not properly understood early enough in the project. If the true significance of landslides is not appreciated until construction, they may cause project abandonment, or delays in commissioning while remedial works are undertaken.
2. Although most of the investments and construction activities usually concentrate on the dam and its ancillary structures, the lake and its operation are the key resource of most reservoir projects.
3. Slope stability hazards must be evaluated for reservoir projects to the same degree as floods and earthquake hazards, and must then be incorporated into dam safety programmes for long-term management.
4. The investment value of a reservoir project may be seriously affected or completely lost through poorly managed landslide risks. Sufficient

gestion des risques de glissement de terrain. Des études suffisantes doivent être exécutées pour s'assurer que le risque associé à une rupture de versant est acceptable du point de vue financier, environnemental et de la sécurité publique.

5. Des considérations techniques et économiques nécessitent que des reconnaissances et études des glissements de terrain soient entreprises au cours des premières étapes d'étude du projet. Si les reconnaissances de base décèlent des problèmes potentiels, il peut être nécessaire d'entreprendre des mesures de déformations et un contrôle des conditions hydrogéologiques. La détermination des vitesses des mouvements et des conditions hydrogéologiques requiert souvent de longues périodes d'observations. L'installation suffisamment tôt d'un dispositif d'auscultation simple et peu coûteux peut s'avérer très bénéfique dans les étapes ultérieures.
6. Si des dangers d'instabilité de versant sont identifiés suffisamment tôt, il est possible d'apporter des modifications appropriées dans le projet et l'exploitation prévue de l'aménagement, sans interférence avec la construction. Le plus souvent, cela conduit à des solutions plus faciles et moins coûteuses que dans le cas où le danger serait détecté plus tard. Il est presque toujours plus facile et moins cher de prévenir une réactivation d'un glissement de terrain que de stabiliser un versant présentant des signes de glissement.
7. Des techniques avancées de reconnaissances in situ, d'essais en laboratoire et de calcul de stabilité sont maintenant disponibles. Cependant, du fait de la nature complexe des glissements de terrain et de l'effet de la retenue, il est souvent difficile de définir des mécanismes de rupture spécifiques et d'effectuer un calcul de stabilité significatif. Cela peut conduire à une importante incertitude dans la détermination du danger et du risque.
8. Dans de tels cas, le maître d'ouvrage, les organismes publics et le personnel technique de l'aménagement sont confrontés à des décisions difficiles à prendre, beaucoup d'entre elles faisant appel à des jugements professionnels. Dans ces situations, une méthode de gestion du risque doit être adoptée. Cela peut entraîner des travaux de stabilisation, des mesures d'auscultation et l'établissement de plan d'alerte.

1.5. DÉFINITIONS

Les termes « danger » et « risque » ne sont pas utilisés uniformément dans la littérature internationale. Pour le présent Bulletin, ils sont définis comme suit :

- *Danger* : source de préjudice potentiel ou situation susceptible de causer des pertes.
- *Risque* : mesure de la probabilité et de la gravité d'un danger. Il peut s'exprimer sous la forme de la probabilité statistique de rupture et des conséquences (potentielles) de l'événement (préjudices, pertes ou dégâts).

investigation must be carried out to ensure that the risk associated with a slope failure is acceptable from the perspectives of finance, the environment and public safety.

5. Technical and economic reasons require the landslide investigations to be initiated at the earliest stages of a project. If the basic reconnaissance indicates potential problems, it may be necessary to initiate measurements of deformation and monitoring of hydrogeological conditions. Prolonged observation periods are often required to define movement rates and hydrogeological conditions. Early installation of simple, low-cost monitoring can prove to be of enormous benefit at later stages.
6. If slope stability hazards are identified at an early stage, appropriate modifications can be introduced in the design and envisaged operation of the project without interference with construction. In most cases this results in cheaper and easier solutions than if the hazard is identified later. It is almost always easier and cheaper to prevent activation of a landslide than to stabilise a failing slope.
7. Advanced techniques of field investigation, laboratory testing and stability analysis are now available. However, because of the complex nature of landslides and reservoir interaction, it is often difficult to define specific failure mechanisms and complete a meaningful stability analysis. This may still leave substantial uncertainty in the determination of hazard and risk.
8. In such cases, the owners of the project, consenting authorities and the project's technical personnel have to face difficult decisions, many of which rely to a large extent on professional judgments. In these situations, a risk management approach has to be adopted. This may involve stabilisation, monitoring and preventative emergency preparedness.

1.5. DEFINITIONS

The terms “ hazard ” and “ risk ” are not consistently used in the international literature. For the purposes of this Bulletin they are defined as :

- *Hazard* is a source of potential harm or a situation with a potential to cause loss.
- *Risk* is a measure of the probability and severity of a hazard. It may be expressed as the statistical probability of failure and the (potential) consequences of the event (injury, loss or damage).

2. EXPÉRIENCE INTERNATIONALE

Le domaine des phénomènes de mouvement de masse associés aux retenues a été identifié à partir de la documentation disponible, des réponses au questionnaire adressé aux pays membres de la CIGB, des expériences personnelles de membres du Comité, et de contributions relatives à un certain nombre d'exemples sélectionnés, bien documentés.

Les données ont été utilisées pour définir le domaine des problèmes rencontrés. Elles constituent la base des chapitres du Bulletin traitant de la gestion des dangers et risques associés aux versants de retenues.

Les recherches de documentation ont identifié des rapports signalant des phénomènes d'interaction retenue-versant dans 176 retenues situées dans plus de 40 pays. On constate que 89 % des exemples concernent des mouvements de masse, les 11 % restants signalant des dangers provenant d'avalanches de neige, de chutes de glace, ou de débâcles de glacier.

2.1. DOMAINE DES PROBLÈMES RENCONTRÉS

Les exemples recueillis indiquent un large domaine de problèmes associés aux glissements de terrain et aux retenues. Riemer (1992) a fourni une revue approfondie et bien documentée de 145 exemples. La liste suivante de problèmes potentiels s'appuie largement sur cette étude :

- Glissements importants, incluant la réactivation d'anciens glissements,
- Glissement déclenché par une baisse rapide du niveau d'eau, à l'intérieur d'une retenue et également à l'aval de ses ouvrages d'évacuation,
- Glissements de surface et activation de lobes frontaux d'anciens glissements,
- Glissements de deltas de sédiments formés dans la retenue,
- Glissements à l'aval de la retenue, résultant d'aspersion, de percolation ou d'affouillement,
- Glissements dans des bassins versants avoisinants, dus à des percolations provenant de la retenue,
- Érosion des rives provoquée par des ondes,
- Érosion des rives de la rivière à l'aval,
- Barrage constitué par un glissement de terrain et onde de rupture de barrage consécutive,
- Ondes de translation,
- Érosion interne de matériaux fins, résultant des variations du niveau de retenue (et du niveau aval),
- Affaissement et rupture de sols de lœss, susceptibles de se produire sur des zones très étendues,
- Rupture de terrain karstique,

2. INTERNATIONAL EXPERIENCE

The range of mass movement phenomena associated with reservoirs has been identified from the available literature, responses to questionnaires distributed to ICOLD member countries, the personal experiences of Committee members and from contributions related to a number of selected, well-documented case histories.

The data have been used to identify the range of problems encountered. They form the basis for subsequent sections of the Bulletin discussing the management of reservoir slope hazards and risk.

Literature searches have identified reservoir-slope interaction reports at 176 reservoirs in over 40 countries. General mass movement comprises 89 % of the case histories, while the remaining 11 % comprise hazards from snow avalanches, icefalls or glacier outbreak floods.

2.1. RANGE OF PROBLEMS ENCOUNTERED

Case histories indicate a wide range of problems associated with landslides and reservoirs. Riemer (1992) has provided an extensive and well-referenced review of 145 case histories. The following list of potential problems is based largely on his review :

- Major landslides, including reactivation of ancient landslides,
- Sliding initiated by rapid drawdown, both within reservoirs and downstream from their outlets,
- Superficial slides and activation of frontal lobes of old slides,
- Sliding of sediment deltas formed in the reservoir,
- Slides downstream from the reservoir caused by spray, seepage or scour,

- Slides in adjacent catchments due to seepage from the reservoir,

- Wave erosion on reservoir shorelines,
- Downstream river bank erosion,
- Landslide dams and subsequent dam-break floods,

- Impulse waves,
- Internal erosion of fine grained materials due to reservoir (and tailwater) fluctuations,
- Subsidence and collapse of loess soils, potentially over very wide areas,

- Collapse of karst terrain,

- Flottation de tourbes et de sols pumiqueux par une retenue,
- Rupture et retrait accélérés de glaciers,
- Effets thermiques dans les régions de permafrost,
- Dissolution de roches,
- Effets de déstabilisation des échanges d'ions dans les argiles.

Les effets de tels phénomènes peuvent être les suivants :

- Inondation à l'amont résultant de barrages créés par des glissements de terrain,
- Dommages aux populations aval et au barrage, dus à la rupture d'un barrage créé par un glissement de terrain dans la retenue ou dans le bassin versant amont,
- Dégâts causés au barrage et aux ouvrages annexes par l'impact direct du glissement de terrain ou par l'onde de translation,
- Dégâts et inondation causés par l'onde de translation et affectant les populations et les ouvrages situés le long des rives,
- Dégâts dus au souffle d'air provoqué par une avalanche ou un glissement de terrain de vitesse élevée dans une vallée étroite,
- Obstruction d'évacuateurs de fond par des détritits,
- Contraintes d'exploitation sur les niveaux de retenue ou sur l'amplitude et la vitesse admissibles de vidange,
- Retard ou même abandon du projet,
- Perte de capacité de retenue,
- Perte ou restriction d'utilisation des sols le long des rives de la retenue,
- Perte de valeur dans le domaine des loisirs,
- Réduction de la qualité de l'eau.

2.2. ÉPOQUES OÙ SE PRODUISENT DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les ruptures de versants peuvent être des phénomènes épisodiques ou aléatoires, tels que des avalanches de neige, des chutes de roche ou des glissements de terrain déclenchés par des conditions climatiques extrêmes ou des séismes, ou peuvent se produire par suite d'une détérioration à long terme conduisant à une rupture progressive.

L'époque la plus critique pour un glissement de versant a été généralement associée au premier remplissage d'une retenue. Riemer (1992), à partir d'une étude portant sur 60 cas de glissements de terrain, a indiqué que 85 % de ceux-ci ont pris naissance au cours de la construction ou du remplissage de la retenue, ou au cours des deux années après l'achèvement de l'aménagement. D'autres études ont montré également une diminution marquée du risque à mesure que le temps passe (par exemple, Jones *et al*, 1961, Nakamura, 1985).

- Flotation of peat and pumiceous soils by a reservoir,
- Accelerated breakup and retreat of glaciers,
- Thermal effects in permafrost regions,
- Dissolution where evaporite rocks are present,
- De-stabilising effects of ion exchanges in clays.

The effects of such problems may include the following :

- Upstream flooding caused by landslide dams,
- Damage to downstream communities and to the dam, caused by the breaching of a landslide dam either in the reservoir or in the upstream catchment,
- Direct landslide impact or impulse wave damage to the dam or ancillary structures,
- Impulse wave damage and flooding of shoreline communities and infrastructure,
- Damage by air blasts caused by very fast-moving landslides or avalanches in narrow valleys,
- Blockage by debris of low-level outlets,
- Operational constraints on pool levels or the amount and rates of allowable drawdown,
- Project delays or even abandonment,
- Loss of reservoir storage,
- Land use loss or restrictions along the reservoir shoreline,
- Loss of recreational value,
- Reduction in water quality.

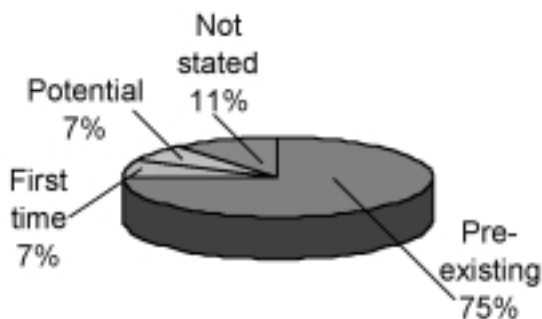
2.2. TIMING OF LANDSLIDE EVENTS

Slope failures may be episodic or random events such as snow avalanches, rockfalls or landslides triggered by extreme climatic events or earthquakes, or may develop as a result of long-term deterioration leading to progressive failure.

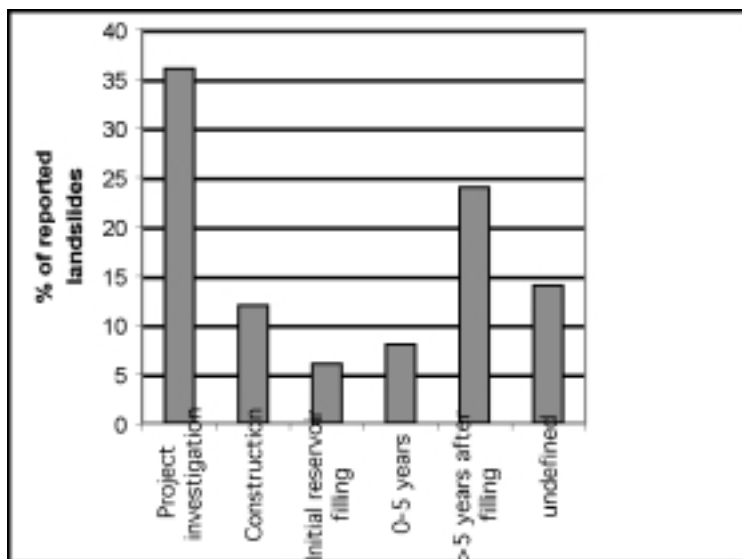
The most critical time for reservoir landslide events has generally been associated with the initial filling of the reservoir. Riemer (1992), from a study of 60 case histories, indicated that 85 % of the slide events started during construction or lake filling, or within 2 years after the completion of the project. Other studies have shown similar pronounced risk recession with the passage of time (e.g. Jones *et al*, 1961, Nakamura, 1985).

2.3. RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE DE LA CIGB

Les réponses au questionnaire adressé aux pays membres de la CIGB et à d'autres organisations sont résumées ci-après. Ces réponses concernent 105 glissements de terrain dans 50 retenues situées dans six pays. Les types de glissements de terrain identifiés sont indiqués sur la Fig. 1.



Les glissements de terrain furent identifiés pour la première fois à diverses étapes d'un aménagement, depuis les reconnaissances jusqu'à plus de cinq ans après le remplissage initial de la retenue, comme indiqué sur la Fig. 2.



Les effets potentiels perçus pour les glissements de terrain identifiés comprenaient des obstructions de vallées, des ondes de translation, des dégâts à des infrastructures, des dégâts à des ouvrages de l'aménagement (barrage, usine, évacuateur de crue, ouvrages de fuite), et des pertes de vies humaines. La Fig. 3 indique que pour les retenues affectées par des glissements de versants l'effet

2.3. ICOLD QUESTIONNAIRE RESPONSE

Responses to a questionnaire circulated within ICOLD and other organisations are summarised below. Questionnaire responses covering 105 landslides on 50 reservoirs in six countries were received. The types of landslides identified by the survey are shown in Fig. 1.

Fig. 1
Types of landslide identified
Types de glissements de terrain identifiés

Pre-existing	75 %	<i>Préexistants</i>	75 %
First time	7 %	<i>Première fois</i>	7 %
Potential	7 %	<i>Potentiels</i>	7 %
Not stated	11 %	<i>Non spécifiés</i>	11 %

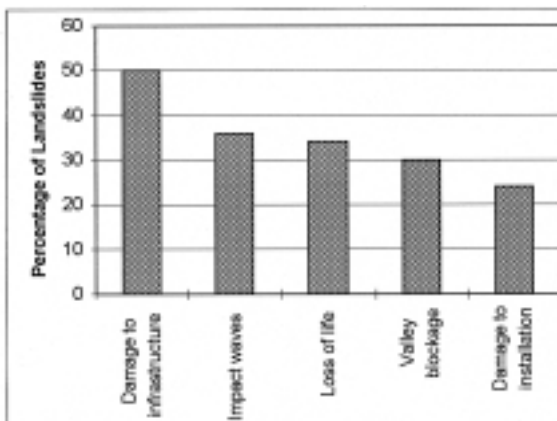
The landslides were first identified at various stages of a project, from investigation to more than five years after initial filling of the reservoir, as shown in Fig. 2.

Fig. 2
Time landslides first identified
Époques où les glissements de terrain furent identifiés pour la première fois

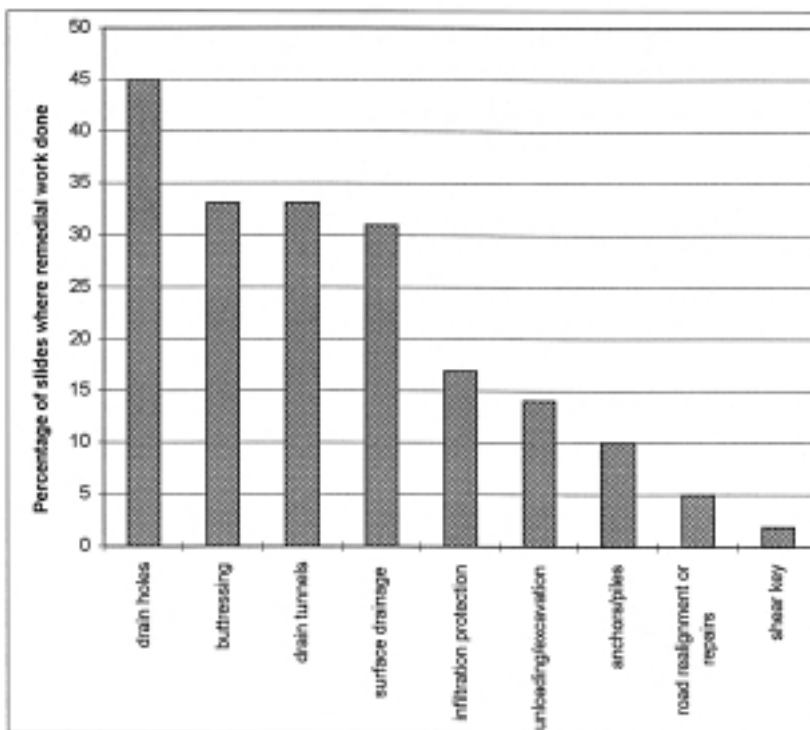
% of reported landslides	<i>% de glissements de terrain répertoriés</i>
Projet investigation	<i>Reconnaissances lors du projet</i>
Construction	<i>Construction</i>
Initial reservoir filling	<i>Remplissage initial de la retenue</i>
0-5 years	<i>0-5 ans</i>
> 5 years after filling	<i>> 5 ans après le remplissage</i>
Undefined	<i>Non définies</i>

Perceived potential effects of the identified landslides included valley blockage, impulse waves, damage to infrastructure, damage to the installation (e.g. dam, powerhouse, spillway, tailrace), and loss of life. Fig. 3 shows that for landslide-affected reservoirs the most common potential effect is damage to infrastructure, but about one third of reservoir landslides had the potential to cause loss of life,

potentiel le plus courant est la détérioration d'infrastructures, mais qu'environ un tiers des glissements pouvaient causer des pertes de vies humaines, des ondes de translation et/ou des obstructions de vallées. Les dégâts réels causés par des glissements de versants ne rentraient pas dans le cadre de l'enquête.



Des travaux de stabilisation furent nécessaires pour 40 % des glissements identifiés. Les informations recueillies indiquent que 69 % de ces travaux ont été couronnés de succès, 9 % ont échoué et aucun détail n'a été donné pour le pourcentage restant. Les types de travaux de stabilisation exécutés sont indiqués sur la Fig. 4.



impulse waves and/or valley blockage. The actual damages caused by reservoir landslides were not covered by the survey.

Fig. 3

Potential effects of landslides

Effets potentiels des glissements de terrain

% of landslides	<i>% de glissements de terrain</i>
Damage to infrastructure	<i>Dégâts à des infrastructures</i>
Impact waves	<i>Ondes de translation</i>
Loss of life	<i>Perte de vies humaines</i>
Valley blockage	<i>Obstruction de la vallée</i>
Damage to installation	<i>Dégâts à des ouvrages de l'aménagement</i>

Remedial stabilisation works were required for 40 % of the identified landslides. Of the stabilisation works, 69 % were reported successful, 9 % were unsuccessful, and no details were given for the remainder. The types of remedial works carried out are shown in Fig. 4.

Fig. 4

Types of remedial works carried out

(Combinations of methods are commonly used)

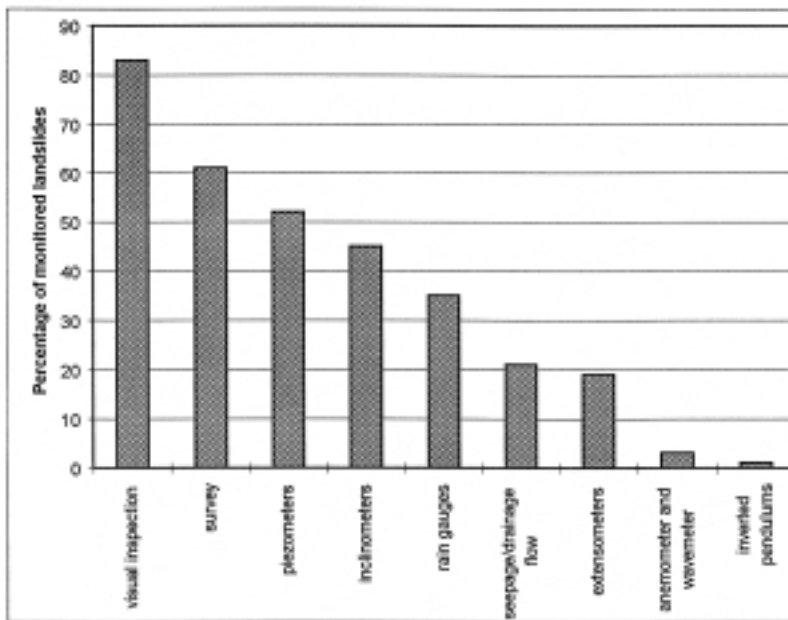
Types de travaux de confortement exécutés

(Des combinaisons de méthodes sont généralement utilisées)

% of slides where remedial work done	<i>% de glissements ayant conduit à des travaux de confortement</i>
Drain holes	<i>Trous de drainage</i>
Buttressing	<i>Confortement par contreforts (butées)</i>
Drain tunnels	<i>Galeries de drainage</i>
Surface drainage	<i>Drainage en surface</i>
Infiltration protection	<i>Protection contre les infiltrations</i>
Unloading/excavation	<i>Déchargement/déblai</i>
Anchors/piles	<i>Ancrages/pieux</i>
Road realignment or repairs	<i>Réalignement ou réparation de route</i>
Shear key	<i>Clavette de cisaillement</i>

Sur les 50 retenues répertoriées, 14 ont été soumises à des restrictions d'utilisation des sols, 6 à des limitations de niveau d'exploitation et 3 à des limitations de vitesse de vidange.

Les réponses ont signalé que 66 % des glissements de terrain étaient auscultés. La Fig. 5 indique les pourcentages de glissements auxquels ont été appliquées diverses méthodes d'auscultation.



2.4. LEÇONS-CLÉS TIRÉES DES EXEMPLES CHOISIS

Les analyses effectuées par le Comité Technique de la CIGB ont mis en évidence de nombreux exemples où d'importants glissements de versants de retenues avaient été convenablement traités et gérés.

Le présent chapitre du Bulletin résume les leçons tirées d'expériences internationales au cours des 30 dernières années, comme l'illustrent quatre cas d'importants glissements de versants de retenues. Le but est de faire ressortir l'expérience acquise par les professionnels et les maîtres d'ouvrage dans ce domaine, et de montrer comment les ingénieurs et les géologues travaillant sur des projets ultérieurs ont été capables d'en tirer des enseignements et de s'appuyer sur l'expérience des autres. Des détails complémentaires sur chacun des glissements sélectionnés sont donnés dans l'Annexe A – Exemples sélectionnés. Les quatre exemples choisis sont examinés dans un ordre chronologique afin d'illustrer la progression de l'expérience.

Of the 50 reservoirs reported in the survey, 14 had restrictions on land use, 6 had restricted operating levels and 3 had restricted rates of drawdown.

Respondents indicated that 66 % of the landslides were monitored. Monitoring methods are shown in Fig. 5 as a percentage of the number of monitored landslides.

Fig. 5
Monitoring methods used
(Combinations of methods are commonly used)
Méthodes d'auscultation utilisées
(*Des combinaisons de méthodes sont généralement utilisées*)

% of monitored landslides	<i>% de glissements de terrain auscultés</i>
Visual inspection	<i>Inspection visuelle</i>
Survey	<i>Auscultation topographique</i>
Piezometers	<i>Piézomètres</i>
Inclinometers	<i>Inclinomètres</i>
Rain gauges	<i>Pluviomètres</i>
Seepage/drainage flow	<i>Débit de percolation/drainage</i>
Extensometers	<i>Extensomètres</i>
Anemometer and wavemeter	<i>Anémomètre et appareil de mesure d'ondes</i>
Inverted pendulums	<i>Pendules inversés</i>

2.4. KEY LESSONS FROM SELECTED CASE HISTORIES

The surveys carried out by the ICOLD Committee found many examples where large landslides at reservoirs have been safely treated and managed.

This section of the Bulletin summarises the lessons learned from international experiences during the last 30 years, as illustrated by four major reservoir landslide case histories. Its purpose is to emphasise the experience of technical professionals and owners of reservoir projects, and to show how the engineers and geologists working on later projects have been able to learn from and build on the experience of others. More details of each project are contained in Appendix A - Selected Case Histories. The four case histories are discussed in chronological order to illustrate the progression of experience.

2.4.1. Glissement de Vaiont, Italie

Ce glissement caractérisé par un important volume (plus de 270 millions de m³) et une vitesse élevée (jusqu'à 30 m/s) se produisit depuis le Mt Toc dans la retenue de Vaiont, récemment mise en eau et située sur la rivière Piave – Italie du Nord –, le 9 octobre 1963. Il causa le déversement d'une vague de plus de 100 m de hauteur sur la crête du barrage et obstrua la vallée sur une hauteur dépassant largement le niveau de la crête du barrage. La vague provoqua d'énormes dégâts et pertes de vies humaines à l'aval du barrage.

Vaiont constitua un précédent dans les glissements de terrain catastrophiques. Il a conduit, dans une large mesure, à porter une plus grande attention à la stabilité des versants de retenues, au cours des dernières décennies.

L'accident de Vaiont attire l'attention des géotechniciens et des propriétaires de barrages et de retenues sur les points suivants :

- Des glissements préexistants peuvent être très sensibles et être réactivés, avec des conséquences dévastatrices, lorsqu'ils sont soumis aux effets d'une retenue,
- L'importance d'une connaissance approfondie de la géologie (lithologie, structure, propriétés des matériaux) et de l'hydrogéologie des rives de la retenue,
- L'importance des recherches, des reconnaissances et de l'évaluation de précédents signes d'instabilité dans la cuvette de la retenue,
- L'évaluation des dangers présentés par des veines ou des couches de faible résistance dans un versant, spécialement si elles sont inclinées vers la retenue,
- La nécessité d'une analyse géotechnique sur des modèles suffisamment fiables, avec une bonne connaissance de leurs incertitudes et limites,
- L'effet des variations du niveau de retenue sur la stabilité du versant,
- L'importance des effets associés des variations rapides du niveau de retenue et des chutes de pluie sur la stabilité du versant,
- La valeur de résultats d'auscultation fiables, de l'interprétation rapide des données, et d'interventions appropriées,
- La difficulté de prédire l'époque de la rupture, la vitesse du glissement et les dimensions de l'onde produite,
- Des scénarios de cas les plus défavorables doivent être pris en compte.

2.4.2. Glissement n° 5 de Tablachaca, Pérou

Le barrage et la retenue de Tablachaca sur la rivière Mantaro – Andes Centrales du Pérou – sont situés dans une zone présentant une activité sismique. Plusieurs glissements de terrain importants existent autour de la retenue. Le glissement n° 5, immédiatement à l'amont de l'appui rive droite du barrage-poids, de 72 m de hauteur, fut décelé avant la construction, mais fut jugé superficiel. Quelques reconnaissances furent effectuées mais aucuns travaux de confortement ne furent entrepris avant la mise en eau de la retenue qui débuta en septembre 1972.

2.4.1. Vaiont Slide, Italy

This large volume (more than 270 million cubic metres) and high velocity (up to 30 m/s) slide occurred from Mt. Toc into the newly filled Vaiont reservoir on the Piave River in Northern Italy on October 9, 1963. It caused a wave to overtop the dam by more than 100 metres and blocked the valley to a height well above the dam crest level. The wave resulted in massive destruction and loss of life downstream from the dam.

Vaiont became the precedent catastrophic landslide. It is largely responsible for a marked change in the emphasis placed on the stability of reservoir slopes in recent decades.

The Vaiont experience illustrates to the geotechnical profession and the owners of dams and reservoirs :

- That pre-existing landslides can be highly sensitive and can be reactivated with devastating results when a reservoir is formed against them,
- The importance of a thorough understanding of the geology (lithology, structure, material properties) and hydrogeology of the reservoir rim,
- The importance of searching for, recognising and evaluating precedent evidence for past instability in the reservoir basin,
- The significance of weak seams or layers in a slope, especially if inclined towards the reservoir,
- The need for sufficiently reliable models for geotechnical analysis, with clear acknowledgement of their uncertainties and limitations,
- The effect of changing reservoir levels on slope stability,
- The significance of the joint effects of rapid reservoir level changes and the various influences of rainfall on slope stability,
- The value of reliable monitoring data, prompt data evaluation and appropriate responsive actions,
- The difficulty in predicting time of failure, landslide velocity and subsequent wave size,
- Worst case scenarios must be taken into account.

2.4.2. Tablachaca Slide No.5, Peru

The Tablachaca Dam and reservoir on the Mantaro River in the Central Andes of Peru is situated in a seismically active area. Several large landslides are present around the reservoir. Slide No. 5, immediately upstream from the right abutment of the 72 m high gravity dam, was noticed before construction but judged to be superficial. No remedial works and few investigations were undertaken prior to lake filling which started in September 1972.

Le remplissage de la retenue déclencha un mouvement dans les parties centrale et amont de la zone de glissement, et 60 000 m³ environ de matériaux pénétrèrent dans la retenue à des vitesses approchant 0,5 m/jour. Des mouvements modérés continuèrent au cours de l'exploitation ultérieure de la retenue, mais le glissement apparut manifestement plus actif en 1979 après des pluies intenses.

L'auscultation mit en évidence un type très net de mouvements saisonniers, avec des vitesses de mouvement augmentant lors de chaque saison humide. Les travaux de stabilisation exécutés entre la fin de l'année 1982 et le début de l'année 1984 comprirent des contreforts (butées) de pied, des ancrages précontraints, des galeries de drainage et des drains radiaux, des drains de pied horizontaux, et des travaux en surface pour dévier et maîtriser les ruissellements.

Des enseignements importants ont été tirés de l'expérience de Tablachaca (Hutchinson, 1986 ; Millet *et al*, 1992) :

- D'anciens glissements peuvent être réactivés sous l'effet du remplissage d'une retenue,
- Une érosion au pied, causée par l'exploitation de la retenue, peut être un facteur important dans le glissement de matériaux,
- Des glissements actifs et importants sur les bords d'une retenue peuvent être stabilisés avec succès,
- Le contrôle des mouvements des zones de glissement sur le pourtour d'une retenue peut nécessiter une combinaison de mesures,
- Une auscultation à long terme, de très bonne qualité, est importante pour la détection d'une situation qui s'aggrave et la mise en évidence de la nécessité de travaux de reconnaissance et de confortement supplémentaires,
- Des problèmes d'instabilité de versant, dont l'importance n'est pas totalement appréciée au cours de l'évolution du projet, peuvent avoir de graves conséquences financières au cours de l'exploitation,

2.4.3. Arête Dutchmans, Canada

L'arête Dutchmans est un versant rocheux, à forte pente, situé à 1 500 m à l'amont du barrage de Mica, de 247 m de hauteur, construit sur la rivière Columbia – Colombie Britannique, Canada –. Le versant représente un glissement potentiel de roche de 115 millions de m³, dont le pied fut submergé sur une hauteur de 180 m par le remplissage de la retenue.

Aucun mouvement ne fut détecté au cours des quelques années d'auscultation précédant la mise en eau de la retenue, mais un mouvement du versant, de plusieurs cm/an, se produisit au cours du remplissage de la retenue entre 1973 et 1976 (Moore, 1990). De 1986 à 1988, l'arête Dutchmans fut stabilisée en construisant une galerie, de 872 m de longueur, à travers le versant, principalement juste au-dessous de la zone de la faille sous-jacente, et en forant 12 700 m de drains depuis la galerie.

La stabilisation réussie de l'arête Dutchmans, au moyen d'un réseau de drainage, fournit quelques enseignements importants pour la gestion et le traitement du risque de glissement d'un versant de retenue :

- De très importants glissements de terrain peuvent être maîtrisés de façon économique,

Lake filling initiated movement in the central and upstream parts of the slide, and about 60 000 m³ of debris entered the reservoir at velocities approaching 0.5 m/day. Moderate movements continued during subsequent reservoir operation, but the slide became visibly more active in 1979 following intense rain.

Monitoring showed a strong pattern of seasonal movement, with movement rates increasing each wet season. Stabilisation works undertaken between late 1982 and early 1984 consisted of a toe buttress, prestressed anchors, drainage tunnels and radial drains, horizontal toe drains and surface works to divert and control runoff.

Important lessons illustrated by the Tablachaca experience (Hutchinson, 1986 ; Millet *et al*, 1992) are :

- Ancient slides can be reactivated in response to lake filling,
- Toe erosion caused by reservoir operations can be a significant factor in the behaviour of debris slides,
- Large, active landslides on reservoir margins can be successfully stabilised,
- Controlling the movement of landslides on reservoir perimeters may require a combination of measures,
- High quality long-term monitoring is important in detecting a worsening situation and signaling the need for further investigation and remedial works,
- Slope stability problems that are not fully appreciated during project development can have serious financial impact during operations.

2.4.3. Dutchmans Ridge, Canada

Dutchmans Ridge is a steep bedrock slope located 1500 m upstream from the 247 m high Mica Dam on the Columbia River, British Columbia, Canada. The slope is a 115 million m³ potential rockslide, the toe of which was inundated to a depth of 180 m by filling of the reservoir.

No movements were detected during the few years of monitoring prior to lake filling, but movement of the slope at a rate of several centimetres/year occurred during lake filling between 1973 and 1976 (Moore, 1990). From 1986 to 1988, Dutchmans Ridge was stabilised by constructing an 872 metre long adit across the slope, mainly just below the underlying Basal Fault Zone, and the drilling of 12 700 metres of drainholes from the adit.

The successful stabilisation of Dutchmans Ridge by the use of drainage illustrates some important lessons for reservoir landslide risk management and remediation. These include :

- Very large landslides can be controlled economically,

- L'auscultation pendant (et après) le remplissage de la retenue est essentielle pour la détection des variations de piézométrie et de vitesse de mouvement dans les versants instables ou potentiellement instables, affectés par la création d'une retenue,
- Une bonne connaissance de la géologie et des conditions de nappe phréatique est indispensable pour la réussite d'un programme de travaux de stabilisation,
- Divers accidents dans la masse rocheuse peuvent la diviser en compartiments de nappe phréatique, de piézométrie très différente,
- Une pénétration dans chaque compartiment de nappe phréatique est nécessaire pour obtenir un drainage satisfaisant,
- La « méthode des observations » permet d'évaluer l'efficacité des travaux en cours d'exécution, des modifications pouvant ainsi être apportées au projet en vue d'obtenir le maximum d'avantages au moindre coût,
- Une auscultation à long terme est essentielle pour une gestion suivie du risque,
- Des Systèmes d'Acquisition Automatique de Données (SAAD) permettent une auscultation en temps réel et une détection précoce d'une réduction de stabilité du versant.

2.4.4. Gorge de Cromwell – Aménagement hydroélectrique de Clyde, Nouvelle-Zélande

Environ 40 % des rives du Lac Dunstan, retenue créée par le barrage de Clyde, de 102 m de hauteur, sur la rivière Clutha – Ile du Sud, Nouvelle-Zélande – sont concernées par des glissements de terrain (Gillon & Hancox, 1992). La retenue submerge les pieds de 16 glissements rampants ou dormants.

La mise en eau du Lac fut retardée de septembre 1989 à avril 1992, période au cours de laquelle un vaste programme de reconnaissances et des travaux de stabilisation des glissements furent exécutés pour un coût estimatif de 250 millions de dollars US, et un dispositif d'auscultation très étendu fut installé (Gillon *et al*, 1997). Le Lac Dunstan a atteint son niveau normal d'exploitation en septembre 1993. Une auscultation régulière et des évaluations périodiques de la sécurité se poursuivent au cours de l'exploitation de la retenue.

Cet exemple bien documenté a mis en évidence un certain nombre d'aspects importants du comportement et de la gestion des glissements de versants de retenues :

- D'anciens glissements de terrain, de faible activité, peuvent être extrêmement sensibles à des variations de charge peu importantes,
- Des glissements de terrain peuvent présenter des systèmes de nappe phréatique très variables et complexes, à l'intérieur du glissement proprement dit ainsi que sous la base du glissement,
- À l'intérieur d'une formation géologique relativement uniforme, des glissements de terrain peuvent présenter des caractéristiques très différentes,

- Monitoring during (and after) lake filling is essential for detecting piezometric changes and changes to rates of movement in unstable or potentially unstable slopes affected by the formation of a reservoir,
- Good knowledge of the geology and groundwater conditions is essential to the design of a successful stabilisation programme,
- Various features in the rockmass may divide it into groundwater compartments with vastly different piezometric pressures,
- Penetration of each groundwater compartment is necessary to achieve full drainage benefits,
- The “ observational method ” allows the effectiveness of the works to be evaluated during construction, enabling design changes to achieve maximum benefit at lowest cost,
- Long-term monitoring is essential to on-going management of risk,
- Automatic Data Acquisition Systems (ADAS) allow real time monitoring and early detection of a reduction in the stability of the slope.

2.4.4. Cromwell Gorge - Clyde Power Project, New Zealand

Approximately 40 % of the shoreline of Lake Dunstan, the reservoir behind the 102 m high Clyde Dam on the Clutha River in the South Island of New Zealand, is formed against landslides (Gillon & Hancox, 1992). The lake inundates the toes of 16 creeping or dormant landslides.

Lake filling was delayed from September 1989 to April 1992, during which time an intensive investigation programme and landslide stabilisation works were completed at an estimated cost of \$ US 250 million, and very extensive monitoring instrumentation was installed (Gillon *et al*, 1997). Lake Dunstan reached its final operating level in September 1993. Regular monitoring and periodic safety reviews are continuing into the operational life of the reservoir.

This well-documented case history has illustrated a number of important aspects of reservoir landslide behaviour and management. These include :

- Old landslides with low activity can be extremely sensitive to minor load changes,
- Landslides can have highly variable and complex groundwater systems both within the slide and separately below the slide base,
- Within a comparatively uniform geological setting, landslides can display very different characteristics,

- Au moyen d'un programme approprié, la phase des reconnaissances peut être associée aux travaux de stabilisation, en particulier lorsque des galeries de reconnaissance sont utilisables pour un drainage à l'intérieur du glissement ou sous sa base,
- Pour les glissements présentant un risque élevé pour l'aménagement, un comportement satisfaisant peut être obtenu en réalisant des travaux de confortement en vue de contrecarrer les effets de déstabilisation dus au remplissage de la retenue,
- La méthode des observations a contribué à éliminer entièrement les travaux de confortement sur les glissements de faible risque,
- Un programme de remplissage de la retenue par étapes permet de valider les modèles de versant et de nappe phréatique, et de déterminer également la réponse des systèmes de nappe phréatique et le comportement du versant, avant que la retenue n'atteigne des niveaux critiques,
- Un programme de gestion efficace des risques doit comprendre un plan d'alerte et une auscultation détaillée, ainsi que des procédures d'évaluation des données et de gestion de l'alerte.

- With appropriate planning, the investigation phase can be linked to the stabilisation works, especially where investigation tunnels can be utilised for drainage within or beneath the landslide base,
- For landslides that pose a high risk to the project, satisfactory performance can be achieved by offsetting the de-stabilising effects of lake filling with remedial works,
- The observational approach helped to entirely eliminate remedial works on lesser risk landslides,
- A staged lake filling programme allows validation of the slope and groundwater models, as well as determination of the response of groundwater systems and the behaviour of the slope, before the reservoir reaches critical levels,
- An effective risk management programme must include emergency preparedness planning and detailed monitoring, along with data evaluation and alarm management procedures.

3. PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES

Le présent chapitre indique les problèmes-clés concernant la stabilité des versants de retenues et devant être examinés et résolus par les maîtres d'ouvrage, agences de développement et chefs de projet. Les problèmes techniques signalés sont examinés de façon plus détaillée dans les chapitres suivants du Bulletin.

L'objectif-clé de la gestion d'un problème de versant de retenue est de vérifier que les versants adjacents à une retenue sont suffisamment stables pour permettre, en toute sécurité, le remplissage de la retenue et son exploitation ultérieure.

En vue de réaliser cet objectif, les maîtres d'ouvrage, agences de développement et chefs de projet doivent comprendre :

- Les phénomènes qu'ils ont à traiter,
- Les effets que la retenue et son exploitation peuvent avoir sur la stabilité des versants adjacents,
- Les conséquences possibles d'une rupture de versant.

3.1. CHAMP DE CONSIDÉRATIONS

Certaines retenues peuvent stocker plusieurs km³ d'eau et s'étendre sur des longueurs dépassant 100 km. Ce sont les plus grands de tous les ouvrages créés par l'homme.

Un certain nombre de problèmes doivent être examinés lors de l'étude de la stabilité des versants d'une retenue :

- Une instabilité de versant peut imposer des contraintes à l'exploitation de la retenue, ou même conduire à l'abandon de l'aménagement,
- La sécurité publique peut être une préoccupation plus grande que le danger menaçant le barrage, l'usine ou d'autres biens,
- Un large domaine de situations peut entraîner une instabilité de versant sur le pourtour d'une retenue,
- Le remplissage, l'exploitation ou une vidange anormale de la retenue peuvent causer des changements qui réactivent des glissements préexistants ou déstabilisent des versants potentiellement instables, provoquant « pour la première fois » des glissements,
- Des facteurs extérieurs aux limites de la retenue peuvent affecter la stabilité d'un versant ou les stratégies de gestion des glissements (par exemple, séismes, nappe phréatique régionale, et coulées de détritiques).

3. RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES

This section outlines the key reservoir slope stability issues that must be understood and resolved by reservoir owners, developers and project managers. The technical issues noted here are discussed in more detail in later sections of the Bulletin.

The key objective of reservoir slope management is to ensure that the slopes adjacent to a reservoir are sufficiently safe to enable its successful filling and routine operation.

If they are to achieve this objective, owners, developers and project managers must understand :

- The phenomena with which they are dealing,
- The effects that the reservoir and its operation may have on the stability of adjacent slopes,
- The potential consequences of slope failure.

3.1. RANGE OF CONSIDERATIONS

Reservoirs may store several cubic kilometres of water and be more than 100 km long. They are the largest of all manmade features.

A number of issues must be considered when assessing reservoir slope stability. These include primarily :

- Slope instability may have consequences that constrain reservoir operations or even lead to abandonment of the project,
- Public safety may be a greater concern than the threat to the dam, power plant or other assets,
- A wide range of conditions may lead to slope instability around the reservoir rim,
- Filling, operating or abnormal drawdown of the reservoir may cause changes that reactivate pre-existing slides or cause potentially unstable slopes to destabilise, giving rise to “ first time ” slides,
- Factors beyond the reservoir limits may affect reservoir slope stability or reservoir landslide management strategies (e.g. earthquakes, regional groundwater system, lahars and debris flows).

3.2. EFFETS DE LA RETENUE

Le remplissage d'une retenue réduit généralement, mais peut aussi augmenter, la stabilité de ses versants. Un certain nombre d'effets agissent sur la stabilité des versants :

- Les effets de la submersion du pied, qui dépendent du mode de rupture du versant, de la forme et de l'emplacement de la surface de rupture préexistante ou potentielle, et des conditions hydrogéologiques préexistantes,
- Les changements hydrogéologiques à l'intérieur du versant (et au-dessous et à l'intérieur du glissement si celui-ci existe), y compris la saturation d'un terrain précédemment sec, la mise en pression d'aquifères confinés et les élévations à long terme des niveaux piézométriques,
- La saturation progressive et totale, pouvant altérer les propriétés mécaniques des matériaux du versant,
- Les effets transitoires de nappe phréatique au cours du remplissage ou de la vidange de la retenue,
- La sismicité déclenchée par la retenue peut soumettre les versants à des charges dynamiques,
- L'érosion causée par les ondes et susceptible d'avoir un effet déstabilisateur à long terme si la retenue a une grande amplitude de marnage,
- L'élimination de l'affouillement de pied et de l'enlèvement des matériaux par la rivière peut permettre à un glissement de s'auto-conforter ou d'être en partie conforté par les sédiments déposés dans la retenue,
- L'alluvionnement de la retenue peut obstruer les drains du versant et modifier les conditions de nappe phréatique dans le versant,
- Les fuites provenant de la retenue et l'augmentation des niveaux de nappe phréatique à l'aval du barrage ou dans une vallée adjacente peuvent accroître l'érosion, l'affaissement du terrain ou l'instabilité d'un versant.

L'augmentation du niveau de retenue contre un versant peut avoir divers effets. Pour un glissement de masse de très faible perméabilité, par exemple de l'argile, la montée du niveau de retenue contre le versant peut augmenter la stabilité du glissement. Pour une masse de terrain perméable, avec une surface de glissement incurvée, la stabilité statique diminue au fur et à mesure que la retenue monte jusqu'à un niveau critique, puis augmente de nouveau. Pour une masse de terrain très perméable, avec une surface de glissement plane, la stabilité statique reste constante pour tout niveau de submersion.

La Fig. 6 indique quelques effets des variations du niveau de retenue sur la piézométrie dans le cas d'un versant présentant divers systèmes de nappe phréatique à l'intérieur et au-dessous d'une masse de glissement potentiel. Cependant, suivant les paramètres hydrogéologiques et les caractéristiques de l'aquifère, la réponse de celui-ci peut être différente de celles indiquées sur la Fig. La réponse doit être spécifiquement évaluée, y compris les effets transitoires.

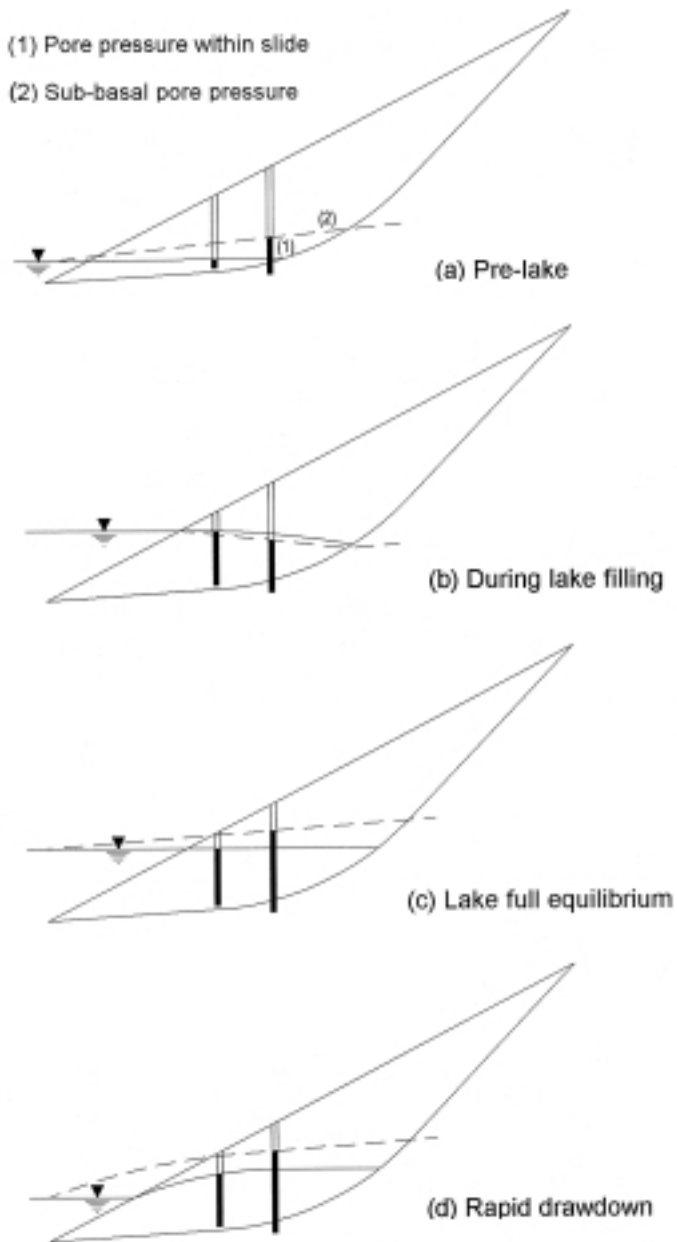
3.2. EFFECTS OF THE RESERVOIR

Impounding a reservoir commonly decreases, but may also increase, the stability of the reservoir slopes. There are a number of effects which have an impact on the stability of the slopes. They include :

- Toe submergence effects which depend on the failure mode of the slope, the shape and location of a pre-existing or potential failure surface, and the pre-existing hydrogeological conditions,
- Hydrogeological changes within the slope (and beneath and within the slide, if one is present) including possible saturation of previously “dry” ground, pressurisation of confined aquifers and long-term rises in piezometric levels,
- Progressive and total saturation, which may alter the mechanical properties of the slope materials,
- Transient groundwater effects during lake filling or drawdown,
- Reservoir-induced seismicity may impose additional dynamic loads on the slopes,
- Wave erosion which may have a destabilising effect in the long term if the reservoir has a large operating range,
- Elimination of toe undercutting and removal by river erosion may allow slides to self-buttress or be partially buttressed by sediment deposited in the reservoir,
- Reservoir sedimentation may obstruct slope drainage and change groundwater conditions in the slope,
- Reservoir leakage and increased groundwater levels downstream of the dam or in an adjacent valley may increase erosion, ground subsidence or slope instability.

Raising the water level against a slope can cause a range of different responses. For a slide mass with very low permeability, such as a clay, the effect of raising the water level against it may be to increase the stability of the slide. For pervious slides with a curved slip surface, the static stability decreases as the water rises to a critical lake level, then increases again. For a very pervious slide mass on a planar failure surface, the static stability remains constant at all levels of submergence.

Fig. 6 indicates some of the effects on piezometric conditions of changing reservoir levels for a slope that has different groundwater systems within and beneath a potential slide mass. However, depending on hydrogeologic parameters and the aquifer characteristics, the response of an aquifer may differ from that shown. The response must be specifically evaluated, including transient affects.



3.3. CONSÉQUENCES POSSIBLES DE L'INSTABILITÉ DE VERSANTS

Les effets physiques des ruptures de versants de retenues sont décrits dans le chapitre 2.1. Parmi les conséquences financières, environnementales et sociales à prendre en considération, on peut citer :

- Pertes de vies humaines et dégâts,

Fig. 6

Possible effects of reservoir water level changes on piezometric levels

Effets possibles des variations du niveau de retenue sur les niveaux piézométriques

- | | |
|--------------------------------|--|
| (1) Pore pressure within slide | (1) <i>Pression interstitielle à l'intérieur du glissement</i> |
| (2) Sub-basal pore pressure | (2) <i>Pression interstitielle sous la base du glissement</i> |
| (a) Pre-lake | (a) <i>Avant remplissage de la retenue</i> |
| (b) During lake filling | (b) <i>Pendant le remplissage de la retenue</i> |
| (c) Lake full equilibrium | (c) <i>Retenue stable</i> |
| (d) Rapid drawdown | (d) <i>Vidange rapide</i> |

3.3. POTENTIAL CONSEQUENCES OF SLOPE INSTABILITY

The physical effects of slope failure into reservoirs are described in Section 2.1. The financial, environmental and social consequences that must be considered include :

- Loss of life and injuries,

- Pertes économiques directes résultant de dégâts provoqués par l'onde d'impact ou l'onde de crue,
- Pertes économiques indirectes, telles que perte de revenus, perte de production électrique et perte d'approvisionnement en eau,
- Dommages environnementaux,
- Coûts sociaux, qui peuvent rarement être estimés en valeurs absolues, mais comprennent des traumatismes post-désastre, des coûts de traitement médical, des coûts de procédure judiciaire, des pertes de sites historiques, des pertes de ressources liées aux loisirs,
- Des effets sur le maître d'ouvrage – par exemple, perte de crédibilité publique, augmentation des assurances « risque », baisse des valeurs des capitaux.

Si le public, le maître d'ouvrage ou les autorités de contrôle considèrent que le niveau de risque est inacceptable, des restrictions sur le développement du projet ou l'exploitation peuvent être imposées. Ces restrictions peuvent entraîner des pertes économiques pour l'aménagement par suite d'augmentation des coûts et de baisse des revenus.

L'augmentation des coûts peut résulter :

- Des travaux de reconnaissances et de stabilisation,
- Des coûts d'auscultation et de gestion à long terme, y compris les coûts de maintenance,
- Des coûts financiers résultant des retards dans le remplissage de la retenue.

La baisse des revenus peut résulter :

- Des retards dans le remplissage de la retenue,
- De la réduction du volume de stockage dans la retenue,
- De restrictions d'exploitation temporaires, saisonnières ou permanentes, concernant le niveau de retenue ou les vitesses de vidange.

En outre, la découverte tardive d'un problème de glissement de terrain, au cours de la construction, de la mise en eau ou de l'exploitation de la retenue, réduit les options dont disposent l'agence de développement ou le maître d'ouvrage. Cela peut entraîner de longs retards et des augmentations de coût. Par exemple, le coûteux retard intervenu dans le remplissage de la retenue créée par le barrage de Clyde, Nouvelle-Zélande (Gillon *et al*, 1997), fut une conséquence de la mise en évidence tardive de conditions défavorables de nappe phréatique à l'intérieur et au-dessous de glissements de terrain connus. À Thissavros, en Grèce, la construction commença alors que l'existence de glissements était toujours en discussion. Le projet nécessita d'importantes modifications qui retardèrent beaucoup l'achèvement des travaux.

La prise en compte, suffisamment tôt au stade du projet, des conséquences possibles des problèmes d'instabilité de versant peut conduire aux résultats suivants :

- Décision de poursuivre le projet,
- Révision du projet en examinant une solution qui réduit les risques associés au glissement de terrain à un niveau acceptable,
- Abandon du projet en faveur d'une autre solution moins coûteuse.

- Direct economic losses as a result of flood or impact wave damage,
- Indirect economic losses such as loss of revenue, loss of electricity, and loss of water supply,
- Environmental damages,
- Social costs, which can rarely be measured in absolute terms but include post-disaster trauma, medical treatment costs, legal costs, loss of historic sites, loss of a recreational resource,
- Effects on the owner – for example, loss of public credibility, upgrading of insurance risk, fall in stock prices.

If the public, the owner or the regulatory authorities consider that the level of risk is unacceptable, restrictions on project development or operation may be imposed. These restrictions may cause economic losses to the project from increased costs or reduced revenue.

Increased costs can arise from :

- Investigation and stabilisation works,
- Long-term operating and monitoring costs, including maintenance,
- Financing costs resulting from delays in reservoir impoundment.

Reduced revenue can result from :

- Delays in reservoir impoundment,
- Reduced storage volumes in the reservoir,
- Temporary, seasonal or permanent operating restrictions in reservoir level or drawdown rates.

In addition, delayed discovery of a landslide problem during construction, impounding or reservoir operation reduces the options available to the project developer or owner. This may cause long delays and increased costs. For example, the costly delay to impounding the reservoir at Clyde dam, New Zealand (Gillon *et al*, 1997) was a consequence of late recognition of adverse groundwater conditions within and beneath known landslides. At Thissavros, in Greece, construction commenced while the existence of landslides was still being debated. The project eventually required substantial redesign that greatly delayed completion.

Consideration of the potential consequences of reservoir slope stability problems early in the project may result in the following outcomes, among others :

- A decision to proceed with the project,
- A revision of the project to an alternative that reduces landslide related risks to an acceptable level,
- Abandonment of the project in favour of a more cost-effective alternative.

4. GESTION DES PROBLÈMES RELATIFS À LA STABILITÉ DES VERSANTS DE RETENUES

Le maître d'ouvrage d'un aménagement existant ou proposé a la responsabilité de s'assurer que les risques vis-à-vis de la sécurité publique et de l'environnement, associés à une retenue, sont étudiés, documentés, réduits ou gérés. Dans de nombreux pays, il existe des prescriptions légales à ce propos. Souvent, le grand public se préoccupe proportionnellement plus des problèmes concernant la stabilité des versants d'une retenue que des autres questions techniques relatives à un aménagement proposé.

Il y a quatre facteurs importants à prendre en considération lors de l'étude des dangers associés aux versants de retenues :

1. Les interactions possibles entre un glissement de terrain et une retenue introduisent des dangers et incertitudes supplémentaires qui n'interviennent pas dans d'autres glissements.
2. La zone à étudier peut être très vaste et s'étendre au-delà des limites de la retenue et des versants adjacents.
3. Les exemples signalés montrent que la majorité – mais non la totalité – des problèmes d'instabilité de versants affectant des retenues concernent des glissements préexistants. Les problèmes peuvent se présenter sur des glissements manifestement actifs, ou des glissements anciens, dormants, et sont souvent difficiles à détecter.
4. Les problèmes surviennent le plus souvent au cours de la mise en eau de la retenue, ou au cours de quelques années après la fin des travaux de l'aménagement.

La mise en œuvre de reconnaissances et d'études approfondies, bien programmées, contribuera à s'assurer que les problèmes potentiels sont identifiés et évalués suffisamment tôt, que les conséquences possibles d'une rupture sont estimées et que, le cas échéant, les traitements correctifs sont évalués avant les engagements financiers. Les reconnaissances et études feront intervenir un expert ayant une expérience dans le domaine des glissements de terrain importants.

Des procédures de gestion et de classement par ordre de priorité doivent être appliquées afin que l'étude systématique des dangers associés aux glissements de terrain ne devienne pas une tâche prohibitive. Il y a de grandes difficultés à quantifier le risque qu'un glissement de terrain fait courir à un aménagement, et également à évaluer si le risque est acceptable. Des méthodes de gestion des risques sont une technique efficace pour classer par ordre de priorité et gérer les risques d'instabilité de versants, à condition que des données techniques suffisantes soient disponibles. Le processus d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques permet d'obtenir d'utiles données pour orienter les décisions quant à l'acceptation des risques, ou au traitement et au contrôle des risques afin qu'ils soient réduits.

4. MANAGING RESERVOIR SLOPE STABILITY ISSUES

The owner of an existing or proposed facility has a responsibility to ensure that public safety and environmental risks associated with a reservoir project are investigated, documented and mitigated or managed. In many countries there are legislative requirements to do this to the satisfaction of public authorities. Often the general public has a proportionally greater concern with reservoir slope stability issues than with other technical issues regarding a proposed facility.

There are four important factors that must be considered when identifying slope hazards in relation to reservoirs :

1. The possible interactions between landslide and reservoir introduce additional hazards and uncertainties that are not a consideration in other landslide situations.
2. The area to be investigated may be very large, and may extend beyond the confines of the reservoir and the adjacent slopes.
3. Case history data show that the majority, but not all, of slope instability problems affecting reservoirs involve pre-existing landslides. The problems may occur either with obviously active landslides or with ancient, dormant landslides which are often difficult to recognise.
4. Problems most commonly develop during lake filling or within a few years after completion of the project.

Investing in thorough, well planned investigations will help ensure that potential problems are recognised and evaluated early, that the possible consequences of failure are appreciated and that, where necessary, remedial options are assessed before major commitments are made. The investigations should include someone with experience in large landslides.

Management and prioritisation procedures must be applied to ensure that the systematic investigation of landslide hazards does not develop into a prohibitive task. There are considerable difficulties in quantifying the risk a landslide poses to a project and also in assessing whether the risk is acceptable. Risk management processes are a powerful technique for prioritising and managing slope stability risks provided that competent technical input is available. The process of identifying, analysing and assessing the risks allows for informed decisions on accepting risk, or treating and controlling risks so that they are minimised.

Le présent chapitre décrit le processus d'étude et d'évaluation des risques d'instabilité de versants, et indique plusieurs aspects importants de gestion du projet.

4.1. LE PROCESSUS

Le processus d'étude et de gestion des problèmes d'instabilité de versants est une séquence logique d'activités d'évaluation technique et de gestion des risques.

Les activités d'évaluation technique comprennent :

- L'identification de l'instabilité réelle ou potentielle d'un versant,
- Les reconnaissances in situ,
- L'établissement et la tenue d'une base de données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques concernant le(s) versant(s),
- La mise au point d'un modèle conceptuel pour le versant,
- L'évaluation de la stabilité du versant, de son potentiel de rupture, du mode probable de rupture et, le cas échéant, du comportement après rupture,
- La détermination des effets hydrauliques d'une rupture du versant,

Les activités associées de gestion des risques comprennent :

- L'évaluation des conséquences possibles d'une rupture de versant,
- L'évaluation du risque et la détermination des stratégies de contrôle du risque,
- La mise en œuvre de mesures d'atténuation du risque,
- Le contrôle du comportement du versant,
- L'utilisation d'analyses périodiques de sécurité en vue d'évaluer séparément le comportement du versant.

La relation entre les études techniques et les activités de gestion des risques est indiquée sur la Fig. 7. Considérées sur toute la durée de développement du projet jusqu'au stade opérationnel, les études apparaissent comme un processus en grande partie séquentielle, avec réintroduction continue de données provenant de l'auscultation des versants et des analyses continues de sécurité, comme le montre la Figure. En pratique, au cours du développement d'un projet de retenue, le processus global est itératif. À cet égard, les problèmes de stabilité de versants de retenues sont identiques à de nombreux autres problèmes concernant des études de projet.

Tout d'abord, il y a une itération dans l'espace, étant donné que le processus est initialement appliqué sur une zone très étendue du projet, avec des détails sommaires ; puis, progressivement l'attention se concentre sur des versants sélectionnés avec augmentation des détails.

Il y a ensuite une autre série d'itérations à mesure que le projet franchit ses diverses étapes de développement, comme l'indique la Fig. 8. À chaque étape, des études techniques et de gestion des risques sont nécessaires et seront suffisamment détaillées pour fournir des évaluations de risque d'instabilité de versant, appropriées

This section describes the process of investigating and assessing slope stability risks and outlines several important project management issues.

4.1. THE PROCESS

The process of investigating and managing slope instability issues is a logical sequence of technical evaluation and risk management activities.

The technical evaluation activities are :

- Identifying actual and potential slope instability,
- Field investigations,
- Establishing and maintaining a database of geological, hydrogeological and geotechnical information for the slope(s),
- Developing and reviewing a conceptual model for the slope,
- Assessing the stability of the slope, its potential to fail, the likely mode of failure and, where applicable, post failure performance,
- Defining the hydraulic effects of slope failure.

The associated risk management activities are :

- Assessing the potential consequences of slope failure,
- Assessing the risk and determining risk control strategies,

- Implementing risk mitigation measures,
- Monitoring slope behaviour,
- Using periodic safety reviews for independently assessing slope performance.

The relationship between these technical and risk management studies is shown in Fig. 7. When viewed over a project's whole development to operational status, the studies are a largely sequential process with continuing long-term feedback from slope monitoring and safety reviews as shown. In practice, during the development of a reservoir project, the whole process is iterative. In this regard, reservoir slope stability issues are similar to many of the other project design issues.

First, there is an areal iteration as the process is initially applied over the wider project area in broad detail followed by a gradual focussing on selected slopes in increasing detail.

There is then another series of iterations as the project proceeds through its various development stages as shown in Fig. 8. At each stage, technical and risk management studies are necessary in enough detail to provide slope stability risk assessments appropriate to that stage and sufficient for project planning. At the

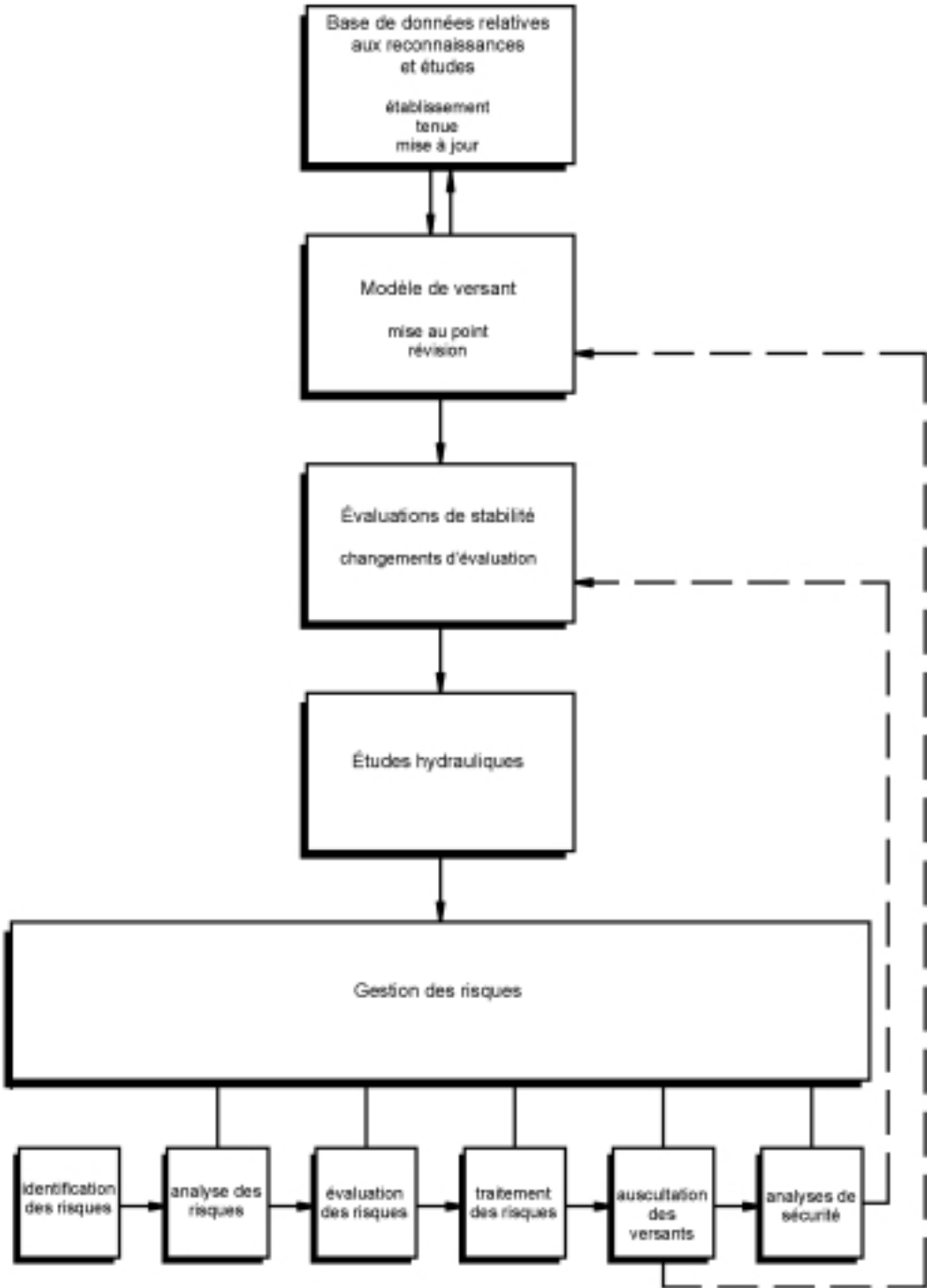


Fig. 7

Processus d'étude et d'évaluation de la stabilité de versants

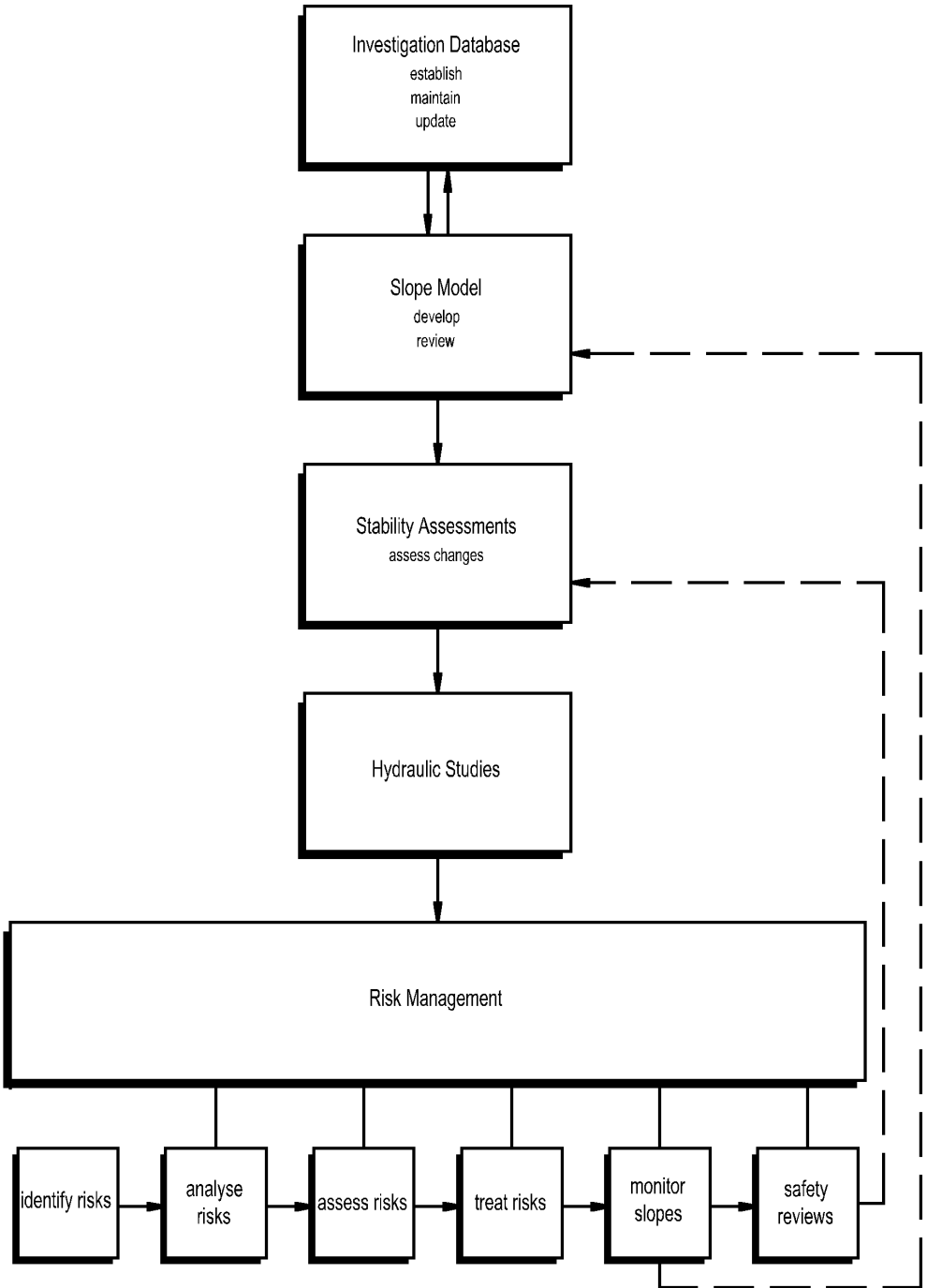


Fig. 7
Slope stability investigation and assessment process

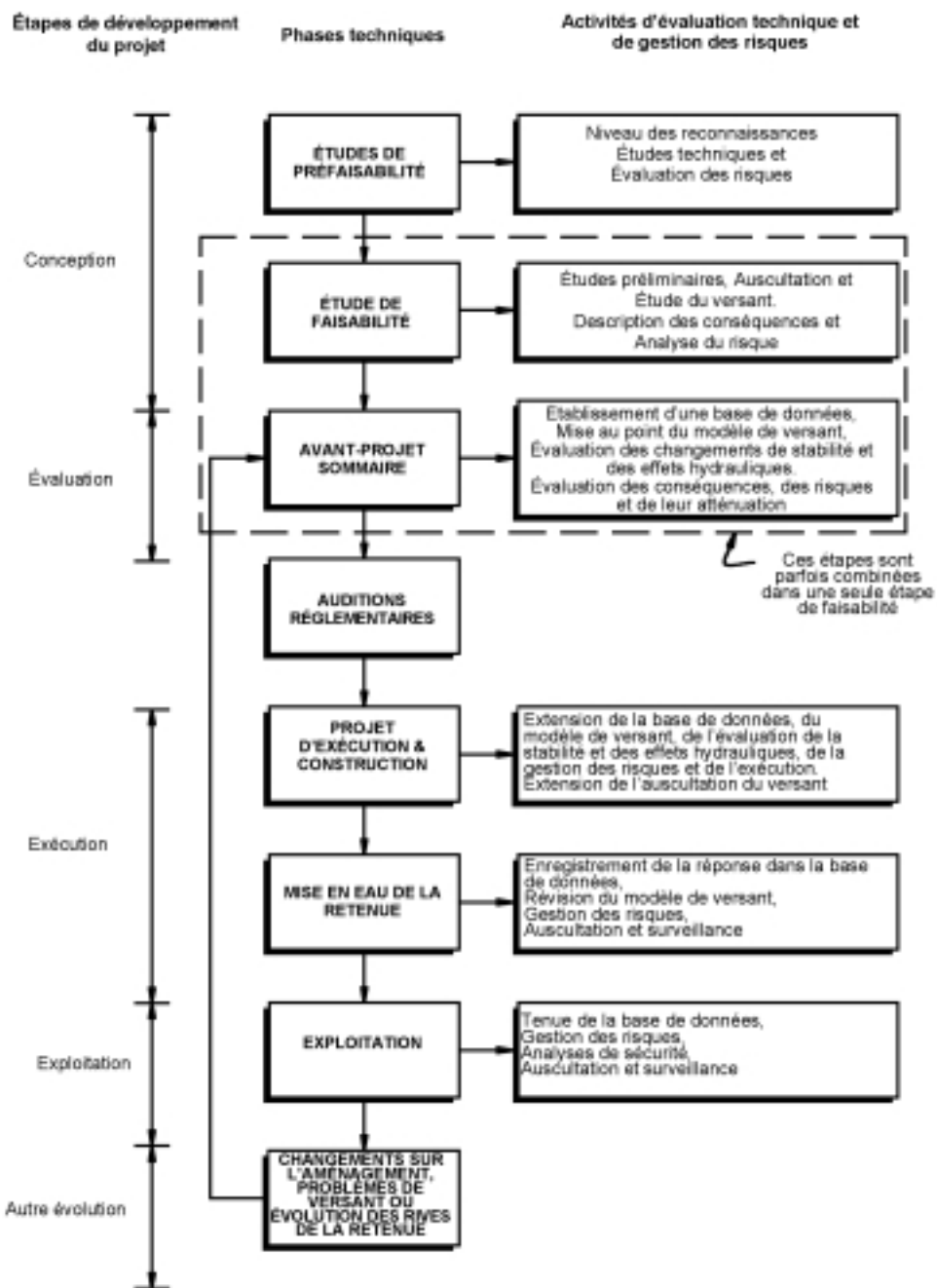


Fig. 8

Caractéristiques des étapes de développement du projet et des études des versants de la retenue

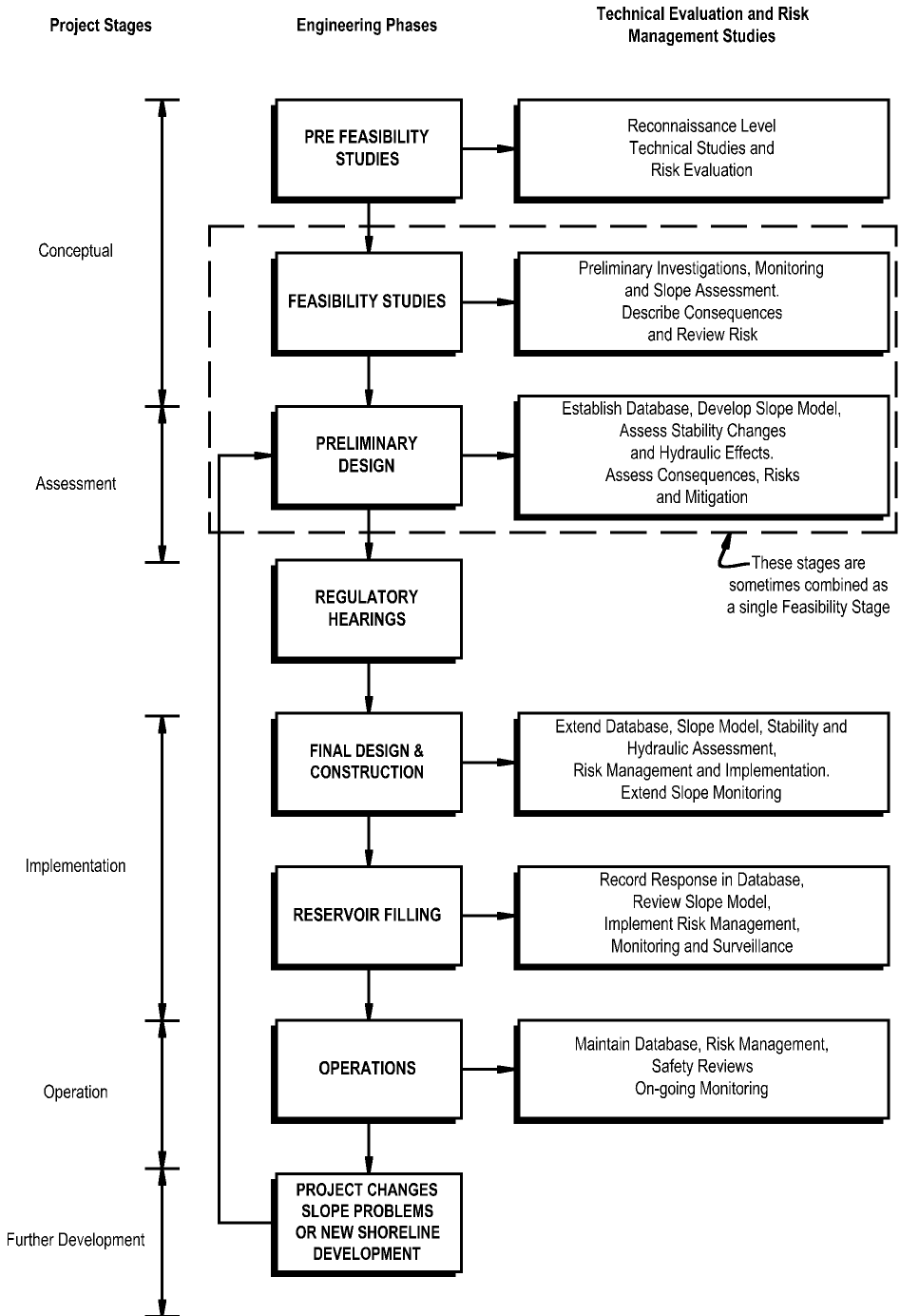


Fig. 8
Typical project stages and reservoir slope studies

à chaque étape et suffisantes pour l'étude du projet. Au stade de la conception, ces études se situeront au niveau des reconnaissances, mais seront de plus en plus détaillées au fur et à mesure que le projet se développe.

À chaque étape du projet, il y a souvent de petites itérations entre les diverses études, en particulier si des conditions plus défavorables sont décelées. Des informations supplémentaires fournies par les reconnaissances ou l'auscultation au cours du processus conduisent souvent à des modifications sur le modèle de versant. Cela nécessite une répétition des travaux d'évaluation. De telles itérations doivent être prévues dans l'étude du projet.

L'ampleur des évaluations détaillées nécessaires à chaque étape dépend de facteurs, tels que l'importance des risques et des conséquences potentielles, et la complexité du versant en question. Si, à une étape, un versant est considéré comme suffisamment stable, ou si les conséquences de sa rupture sont considérées comme acceptables, les phases ultérieures peuvent être éliminées ou abrégées.

Le processus indiqué s'applique aussi à l'examen des problèmes pouvant se manifester au cours de la période d'exploitation d'un aménagement, comme le montre la Fig. 8.

D'autres chapitres du Bulletin décrivent de façon plus détaillée les diverses phases du processus d'identification et de gestion des problèmes d'instabilité de versants de retenues.

Dans les aménagements des types « Design-Build » (« Étude-Construction »), « Build-Operate-Transfer » (« Construction-Exploitation-Transfert »), ou dans certains pays, le champ des étapes de développement du projet et des phases techniques peut être différent de celui indiqué dans la Fig. 8. En particulier, les études de faisabilité peuvent prendre une place plus importante de façon à incorporer la phase d'études préliminaires.

4.2. CLASSEMENT PAR ORDRE DE PRIORITÉ

Pour la réussite de l'évaluation technique et de la gestion des risques, il importe que les tâches soient classées par ordre de priorité afin d'apporter des réponses aux questions-clés suivantes, le plus tôt possible :

1. Quels versants présentent des risques importants pour l'aménagement ?
2. Quelles mesures sont nécessaires pour réduire ces risques ?
3. Le projet peut-il supporter le coût de ces mesures ?

Il est généralement prévu que tous risques majeurs d'instabilité de versants de retenue seront identifiés au cours des phases de préfaisabilité et de faisabilité et que tous les risques d'instabilité de versants seront identifiés au cours de la phase d'avant-projet sommaire.

Lors des phases de préfaisabilité et de faisabilité, des jugements basés sur la géomorphologie et sur les reconnaissances in situ peuvent être suffisants pour identifier les versants susceptibles de présenter très vraisemblablement des risques importants pour l'aménagement.

conceptual stage, these studies will be at a reconnaissance level, but will increase in detail as the project progresses.

Within each project stage there are often smaller iterations between the various studies, particularly if more adverse conditions are found. Additional investigation or monitoring information obtained during the process often leads to changes in the slope model. This requires subsequent assessment activities to be repeated. Such iterations must be expected and allowed for in planning the project.

The amount of detailed assessment required at any stage depends on such factors as the magnitude of the potential consequences and risks, and the complexity of the particular slope. If at any stage a slope is considered sufficiently stable, or the consequences of its failure are considered acceptable, then subsequent steps may be eliminated or abbreviated.

The process outlined also applies to addressing problems that may develop during the operations stage of a project and this is also shown in Fig. 8.

Later sections of the Bulletin describe in more detail the various steps in this process of investigating and managing reservoir slope instability issues.

In Design-Build projects, Build-Operate-Transfer schemes, or in some countries, the scope of the project stages and engineering phases may differ from that shown in Fig. 8. In particular, more emphasis may be placed on the feasibility studies so that they incorporate the preliminary design phase.

4.2. PRIORITISATION

Successful technical evaluation and risk management requires that the project tasks be prioritised to ensure that the following key questions are answered at the earliest possible time :

1. Which slopes represent significant risks to the project ?
2. What measures are needed to mitigate these risks ?
3. Can the project accommodate the cost of these measures ?

It would normally be expected that the major reservoir slope stability risks would be identified in the Pre-feasibility and Feasibility phases, and that all slope stability risks would be identified in the Preliminary Design phase.

At the Pre-feasibility and Feasibility stages, judgements based on geomorphology and reconnaissance level field inspection may be sufficient to identify the slopes most likely to represent significant risk to the project.

D'autres reconnaissances et analyses préliminaires aux stades des études de faisabilité ou d'avant-projet sommaire vérifieront ces jugements et indiqueront les mesures nécessaires pour l'atténuation des risques. Des estimations préliminaires des coûts détermineront les travaux d'intervention sur les versants, qui sont d'un coût inacceptable affectant la viabilité du projet.

Si l'étude du projet s'étend des études de faisabilité à la phase d'avant-projet détaillé, des modifications devront être apportées à la programmation dans le temps de l'évaluation technique et des études de gestion des risques indiquées sur la Fig. 8.

L'utilisation des méthodes d'évaluation des risques permet de concentrer les études sur les emplacements-clés pour les reconnaissances, la stabilisation et l'auscultation, et de classer ces études par ordre de priorité. Ces méthodes contribuent également à identifier tout « défaut fatal » dans le projet. Le chapitre 8 traite de l'utilisation de l'évaluation des risques pour établir les priorités.

4.3. PROBLÈMES DE GESTION DES RISQUES D'INSTABILITÉ DE VERSANTS DE RETENUES

Le présent chapitre indique un certain nombre de problèmes importants de gestion relatifs à des retenues présentant des risques d'instabilité de versants. Beaucoup de ces problèmes sont décrits en détail dans des chapitres ultérieurs et seule une vue d'ensemble est présentée ici.

4.3.1. Prise en compte d'un risque d'instabilité de versant

Un risque d'instabilité de versant doit être pris en compte au cours des études et travaux de l'aménagement.

Les mesures pratiques suivantes contribueront à minimiser ou atténuer les risques à chaque étape des études, construction et exploitation de l'aménagement.

Étapes d'études et de construction

- Évaluer les conséquences potentielles de glissements de terrain adjacents à la retenue et les risques associés. Lorsque des glissements peuvent affecter directement la valeur économique d'un aménagement, s'ils ne sont pas étudiés au début de la phase de projet, ils peuvent également affecter l'obtention des accords ou des autorisations auprès des organismes publics, et conduire à des restrictions d'utilisation des sols et à des contentieux. On doit veiller à diffuser les informations et à consulter le public, au bon moment.
- Obtenir des avis géotechniques et techniques sur la stabilité des versants de la retenue, dans les phases préliminaires du projet.
- Établir et mettre en œuvre un programme approprié de reconnaissances et d'auscultation pour chaque phase du projet et des travaux.
- Établir et assurer la tenue d'une base de données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

Further investigations and preliminary analyses at the Feasibility or Preliminary Design stages will check these judgements and indicate the measures needed to mitigate the risks. Preliminary costings will identify any slope remedial works that represent an unacceptable cost affecting the viability of the project.

If the project planning proceeds from Feasibility Studies to a Tender Design phase, appropriate changes will need to be made to the timing of the Technical Evaluation and Risk Management studies shown in Fig. 8.

The use of risk assessment approaches allows studies to concentrate on key locations for investigation, stabilisation and monitoring, and to be prioritised. They also help identify any “fatal flaw” in the project at an early stage. Chapter 8 discusses the use of risk assessment for setting priorities.

4.3. PROJECT MANAGEMENT ISSUES

This section outlines a number of important project management issues for reservoirs with significant slope stability risks. Many of the issues are described in more detail in later sections but are included here as an overview.

4.3.1. Including a slope risk perspective

A slope-risk perspective must be included in the management considerations and activities for the project.

The following practical steps will assist to minimise or mitigate the risks at each stage of the project.

Investigation and construction stages

- Ensure management recognition of the potential consequences of landslides adjacent to a reservoir and the risks they impose. While landslides can affect the direct economics of a project, if they are not addressed at the project formation stage they can also affect the obtaining of consents or licensing of the project from regulatory authorities, and can result in land use restrictions and possible legal claims. Consideration must be given to timely information release and consultation with the public.
- Obtain specific engineering and geotechnical advice on reservoir slope stability in the early phases of the project.
- Develop and implement an appropriate investigation and monitoring programme for each phase of the project.
- Establish and maintain a database of geological, hydrogeological and geotechnical data.

- Réunir un comité technique, comprenant des experts en matière de glissements de terrains dans des retenues.
- Étudier si une rupture de versant est possible et, dans toute la mesure du possible, prévoir les dimensions et les vitesses du mouvement.
- Évaluer les conséquences des glissements. Si ceux-ci sont potentiellement catastrophiques, étudier et mettre en œuvre des mesures pour réduire les conséquences ou réduire la probabilité de rupture. Les mesures considérées concerneront les types et dispositions générales du barrage et des ouvrages d'évacuation, ainsi que l'éventualité d'une mise en eau de la retenue par étapes.
- Répéter ces études et évaluations, si nécessaire, au cours des diverses phases du projet et des travaux.
- Reconnaître l'importante contribution de l'auscultation des versants aux prises de décisions lors de la gestion des risques.
- Reconnaître que les modèles de glissement de terrain peuvent présenter de grandes incertitudes, et nécessitent une révision des modèles ou des reconnaissances supplémentaires au cours des diverses phases du projet et des travaux.
- Si possible, assurer une maîtrise satisfaisante des débits naturels pour permettre une mise en eau de la retenue par étapes.

Étape de remplissage de la retenue

- Reconnaître que le remplissage de la retenue et les premières années de son exploitation sont des périodes au cours desquelles la probabilité de rupture de versant est augmentée.
- Assurer une séparation entre, d'une part, le contrôle de la retenue et les responsabilités de sécurité et, d'autre part, l'exploitation commerciale jusqu'à ce qu'un niveau élevé de confiance dans la stabilité des versants de la retenue soit obtenu.
- Affecter des moyens pour l'auscultation lors du remplissage de la retenue et l'analyse des résultats.
- Établir des procédures adéquates pour identifier et évaluer toute différence significative entre le comportement prévu et le comportement observé du glissement de terrain.
- Prévoir un budget pour l'installation de dispositifs de mesures complémentaires au cours de la mise en eau de la retenue ou des phases d'exploitation ultérieures. La révision du modèle de versant au cours de la mise en eau de la retenue peut mettre en évidence d'autres exigences.
- Établir des plans d'intervention pour le traitement des incidents et des situations dangereuses au cours de la mise en eau et des étapes ultérieures.
- Établir un programme de mise en eau de la retenue par étapes, avec mesures de paramètres appropriés, tels que déformations, pressions de la nappe phréatique, débits de drainage des versants. Un remplissage par étapes permet d'avoir une revanche convenable sur le barrage au cours des premières phases de mise en eau de la retenue et d'observer le comportement des versants sans risque de déversement sur le barrage.

- Convene a peer review or review board, which includes experience with reservoir landslides.
- Assess whether slope failure is a possibility and, as best as possible, predict the dimensions and rates of movement.
- Assess the consequences of landslide failure. If these are potentially catastrophic, assess and implement measures to reduce the consequences or reduce the likelihood of failure. The measures considered should include the type and layout of the dam and outlet structures as well as the possibility of having a staged lake filling operation.
- Repeat these assessments as required during the various phases of the project.
- Recognise the essential contribution to key risk management decisions of a record of slope monitoring.
- Recognise that the landslide models may have large uncertainties, and require model review or additional investigation during the various phases of the project.
- Where possible, install sufficient flow control to manage natural floods and allow a staged lake filling.

Reservoir filling stage

- Recognise that lake filling and the first few years of reservoir operations are times of increased likelihood of slope failure.
- Separate the reservoir control and safety responsibilities from commercial operations until there is a high degree of confidence in the stability of the reservoir slopes.
- Allocate resources for the demands of lake-fill monitoring and data evaluation.
- Establish appropriate procedures for identifying and evaluating any significant difference between expected and observed landslide behaviour.
- Budget to allow for additional instrumentation to be installed during lake filling or the operational phase of the project. Slope model review during lake filling may indicate further requirements.
- Develop action plans for dealing with incidents and emergencies during and subsequent to lake filling.
- Develop a staged lake filling programme with appropriate parameter monitoring of such features as deformation, groundwater pressures and slope drainage flows. Staged filling results in significant freeboard at the dam during the early phases of lake filling and allows slope behaviour to be observed without the risk of overtopping the dam.

- Utiliser les ouvrages de contrôle des débits du barrage pour maîtriser les crues et maintenir un remplissage de la retenue par étapes.
- Confirmer ou redéfinir des critères d’alerte pour chaque étape de montée du niveau de retenue.
- Examiner si des mesures correctives sont nécessaires à chaque étape.

Période d’exploitation de la retenue

- Poursuivre les études géotechniques et techniques concernant les glissements de terrain.
- Établir des programmes continus d’auscultation des glissements de terrain et d’évaluation de la sécurité.
- Réviser le modèle de versant après toute pluie, vidange ou charge sismique exceptionnelles au cours de la période d’exploitation. Les glissements de terrain peuvent ne pas être sujets à des conditions de chargement les plus sévères au cours des premières années d’exploitation de la retenue.
- Établir des rapports sur le comportement des versants au cours de la période d’exploitation et comparer les résultats aux prévisions faites lors du projet. La gestion des glissements se poursuivra tout au long de la vie de la retenue. Les exploitants et le personnel technique doivent avoir la possibilité de connaître les buts du projet, les prévisions et les données s’y rapportant. Certains changements les plus critiques survenant au cours de la mise en eau de la retenue, le stockage à long terme des données et leur interprétation au cours de cette période sont importants.
- Effectuer des analyses régulières du comportement des glissements de terrain au cours de la vie de la retenue.

4.3.2. Personnel

Une retenue présentant des risques importants d’instabilité de versant nécessitera des connaissances techniques et une gestion, de niveau élevé et couvrant un large domaine, au cours des phases de reconnaissances, d’études et de construction, ainsi que la mise en œuvre d’une auscultation et d’une gestion à long terme, avec établissement de rapports réguliers. Étant donné que les principaux jugements relatifs aux risques d’instabilité de versants sont émis au cours des premières phases du projet, un niveau élevé de connaissances techniques et d’expérience est nécessaire à cette époque.

Le personnel engagé dans les études et travaux d’un aménagement conditionne en fin de compte sa réussite ou le contraire. Une bonne équipe sera bien équilibrée, avec d’excellentes compétences techniques et une très bonne conduite des activités. Les compétences techniques nécessaires aux diverses étapes du projet et des travaux concerneront la géologie régionale et structurale, la géomorphologie, la géotechnique, l’hydrogéologie, l’hydraulique, la conduite des travaux de construction et la gestion des risques.

- Utilise the flow control at the dam to manage floods and maintain a staged lake filling.
- Confirm or redefine alarm criteria for each lake raising stage.
- Evaluate whether remedial measures are required at each stage.

Operational life of the reservoir

- Maintain and continue the geotechnical and engineering assessments developed for the landslides.
- Establish an on-going monitoring plan for the landslides and safety review programme.
- Review the slope model after any unusual rainfall, drawdown or earthquake loadings during the operational phase. The landslides may not be subject to the most severe loading conditions during the initial years of operation.
- Prepare performance reports during the operational phase and confirm against design expectations. Landslide management will continue through the life of the reservoir. Subsequent managers and technical staff must be able to acquire knowledge of the design intent, expectations and relevant data. As some of the most critical changes occur during lake filling, long-term storage of data and its interpretation during this period are important.
- Undertake regular landslide performance reviews during the life of the reservoir.

4.3.2. Personnel

A reservoir project with significant slope stability risks will require a high level and wide range of technical and management expertise through the investigations and construction phases, a commitment to long-term monitoring and proactive management, plus regular reporting (including peer review). Because some of the important slope stability risk judgements are made in the early stages of the project, a high level of technical expertise and experience is required at that time.

The personnel involved in a project ultimately dictate its success or otherwise. A good team will be well balanced, with strong technical skills and good leadership. Technical skills required at different stages in the project will include regional and structural geology, geomorphology, engineering geology, geotechnical engineering, hydrogeology, hydraulics, construction management and risk management.

4.3.3. Incertitudes

La compréhension des problèmes d'instabilité de versants se base sur des estimations très incertaines des conditions existant sous la surface du terrain. Si des risques importants d'instabilité de versants sont identifiés, le chef de projet prévoira une augmentation des coûts et des délais dans le programme des études et travaux au cours de la période allant des études de faisabilité à l'achèvement des travaux.

Les imprévus d'ordre financier et concernant les programmes seront plus importants au cours des premières étapes, ces imprévus étant vraisemblablement affinés au cours des étapes ultérieures. Il est probable qu'il y aura des coûts opérationnels substantiels, incluant l'entretien des ouvrages de correction.

4.3.4. Opérations de contrôle

Dans le cas d'un aménagement important, une opération de contrôle peut être l'une des démarches bénéfiques dans la gestion des incertitudes affectant les reconnaissances et études de glissements de versants, l'application de mesures correctives et le processus de gestion à long terme. Un contrôle efficace nécessite des réunions régulières, principalement sur le site, de façon que l'équipe de contrôle puisse mieux connaître les glissements de terrain, le personnel technique et la gestion du projet.

Un contrôle peut être établi à deux niveaux :

- (a) Contrôle interne – normalement effectué, comme faisant partie du processus d'assurance qualité des ingénieurs conseils ou de l'équipe technique du maître d'ouvrage, par des collègues ou des supérieurs.
- (b) Contrôle externe – par une personne ou une Commission de Contrôle constituée d'experts techniques indépendants, chargée de donner des avis sur les problèmes techniques et de contrôler l'avancement du projet et de la construction. Ces personnes peuvent être engagées par le maître d'ouvrage, les organismes publics ou les établissements de financement.

Pour les aménagements de coût élevé/de risque élevé, le maître d'ouvrage choisira vraisemblablement une Commission de Contrôle. Comme l'indiquent Hoek & Imrie (1995), afin d'obtenir les meilleurs résultats, la Commission de Contrôle sera créée dès le début des études de projet et comprendra des personnes bien expérimentées et indépendantes, choisies pour couvrir chacune des importantes disciplines intervenant dans le projet.

Les membres de la Commission de Contrôle externe ne se substitueront pas aux ingénieurs conseils intervenant normalement. Les rôles respectifs du projeteur et de la Commission doivent être clairement définis.

4.3.5. Archives

Des copies des rapports de la Commission de Contrôle, et de tous autres rapports et dossiers, seront détenues sur le site afin qu'elles restent accessibles en permanence. Les avis émis antérieurement et leurs justifications peuvent avoir une grande importance lors des évaluations futures de sécurité et dans le cas d'un incident.

4.3.3. Uncertainty

The understanding of slope stability problems depends on very uncertain estimates of unique subsurface conditions. If significant slope stability risks are identified, managers should allow for the possibility of increased costs and schedule delays as the project moves through the stages from feasibility to project completion.

Financial and schedule contingencies should be larger in the initial stages, expecting that these will be refined during subsequent stages. It is probable that there will be substantial on-going operational costs, including maintenance of remedial works.

4.3.4. Review

For a major project, peer review may be one of the single most beneficial steps in managing uncertainty in the reservoir landslide investigations, remediation and long-term management process. Effective peer review requires regular meetings, mostly on site, so that the review team can develop knowledge of the landslides, the technical personnel and project management.

Peer review may be established at two levels :

- (a) Internal review - normally undertaken as part of the quality assurance process of the consulting engineers or owner's in-house engineering team by colleagues or superiors.
- (b) External review - by an individual or a Review Board of independent technical experts retained to advise on technical issues and monitor design and construction progress. These reviewers may be retained by the owner, regulatory authorities or financing institutions.

For high cost/high hazard projects the owner is likely to require a Review Board. As described by Hoek & Imrie (1995), to ensure the best results the Review Board should be established early in the project, and should consist of appropriately experienced and independent thinking people carefully chosen to cover each of the major disciplines involved in the project.

External reviewers should not be used as a substitute for normal consulting services. The respective roles of the designer and reviewer must be clearly defined and understood.

4.3.5. Records

Copies of Review Board reports, and all other reports and records, should be held on site to ensure that they remain accessible following commissioning. Past judgments, and the reasons for them, may be of great importance during future safety evaluations or in the event of an incident.

4.3.6. Gestion à long terme

Très souvent, l'auscultation de versants de retenues, l'entretien des appareils de mesure et les mesures correctives doivent être poursuivis pendant toute la vie de l'aménagement.

Un processus systématique d'auscultation, d'évaluation des données et d'examen de contrôle doit rester en place, de façon que des changements dans le comportement des versants puissent être détectés et des mesures prises pour prévenir ou limiter les dégâts.

Les chapitres 10 et 11 traitent, de façon plus détaillée, de l'auscultation à long terme et des conditions requises d'exploitation.

4.3.6. Long-term management

In many cases, reservoir slope monitoring and maintenance of instrumentation and remedial measures must be carried on for the entire life of the project, which can span several working lifetimes.

A systematic monitoring and data evaluation process, including review, will need to remain in place, so that changes in slope behaviour can be detected and steps taken to limit damage or to install preventative measures.

Chapters 10 and 11 discuss long-term monitoring and operational requirements in more detail.

5. RECONNAISSANCES ET ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Il est important de savoir qu'il n'est pas possible d'établir des prescriptions relatives aux programmes de reconnaissances et d'études, valables pour l'ensemble des projets. Pour ces raisons, les recommandations présentées dans le présent Bulletin sont destinées à faciliter la mise au point d'un programme adapté aux conditions spécifiques du projet. Les chapitres suivants fournissent une vue d'ensemble des exigences et objectifs aux diverses étapes des études et des travaux d'un aménagement. Les méthodes de reconnaissances et d'études sont décrites en détail dans d'autres documents (par exemple, « Transportation Research Board », 1996). Les listes de contrôle figurant dans les Annexes B et C peuvent être utiles pour la programmation et l'exécution des reconnaissances et études.

La complexité des grands glissements de terrain traduit que l'obtention et l'interprétation des données géologiques et des résultats des reconnaissances sont souvent difficiles. Il y a lieu de prévoir des modifications de reconnaissances et études géologiques aux diverses étapes d'un projet, et quelques chevauchements entre étapes.

Les reconnaissances et études géologiques débutent par une série de questions générales concernant la géologie régionale et la situation de la nappe phréatique dans la zone de l'aménagement. Les questions fondamentales portent, en particulier, sur la relation entre la structure géologique et la stabilité du versant, les types de roche et de sol, et les contrôles géologiques sur les systèmes de nappe phréatique. Les réponses à ces questions, et à d'autres questions qui interviennent au fur et à mesure de l'avancement des reconnaissances et études, sont obtenues en appliquant progressivement diverses techniques, par étapes, de manière itérative, en allant du général au particulier (Stapledon, 1992).

Des reconnaissances et études complètes de stabilité des versants d'une retenue comprennent non seulement l'évaluation géologique et hydrogéologique du (des) versant (s), mais également l'établissement d'un modèle de rupture de versant, l'étude de stabilité et l'évaluation du risque. Un glissement de terrain préexistant est souvent dû au fait que des caractéristiques géologiques ou hydrogéologiques particulières, ou une combinaison de caractéristiques, étaient ou sont présentes. Les reconnaissances et études doivent déterminer la raison de l'existence du glissement, et son comportement doit être étudié et prévu. L'histoire géologique du glissement de terrain, enregistrée dans le temps, fournit d'utiles informations.

Des analyses de stabilité et des évaluations de risques, suffisamment détaillées, peuvent être effectuées à tout moment au cours des études. Elles contribueront à la mise au point du programme en identifiant (compte tenu des variations sensibles affectant des paramètres) quels sont les paramètres et les variations les plus cruciaux, et elles seront de plus en plus utiles au fur et à mesure que de meilleures données géologiques et hydrogéologiques seront obtenues.

5. GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

It is important to realise that it is not possible to provide a prescriptive investigation programme suitable for all possible projects. For these reasons, the guidelines provided by this Bulletin are intended to help with developing a programme suitable for project-specific conditions and requirements. The following sections provide a general outline of requirements and objectives at different stages of a project. Investigation methods are described in detail elsewhere (e.g. Transportation Research Board, 1996). Checklists included in Appendices B and C may be useful for planning and implementing investigations.

The complexity of large landslides means that there are often difficulties in obtaining and interpreting geological and investigation data. Geological investigation requirements change at different stages of a project, and some overlap between stages should be expected.

Effective landslide investigations begin with a series of general questions relevant to the regional geologic and groundwater setting of the project area. Basic questions include the relationship between geological structure and slope stability, rock and soil types, and geological controls on groundwater systems. Answers to these questions, and further questions that arise as the investigation continues, are then found by progressively applying various investigation techniques in a staged, iterative manner, moving from the general to the specific (Stapledon, 1992).

A complete investigation of reservoir slope stability includes not only geological and hydrogeological evaluation of the slope(s), but also development of a slope failure model, stability assessment and risk evaluation. A pre-existing landslide is likely to have formed because some particular geological or hydrogeological feature, or combination of features, was or is present. Investigations must determine the reason for the landslide's existence if it is to be understood and its behaviour assessed and predicted. The recorded and geological history of the landslide provides useful information.

Appropriately detailed stability analyses and risk assessments may be undertaken at any time through the investigation. They will assist with development of the programme by identifying (using sensible variations in parameters) which are the more crucial parameters and variations, and they will be increasingly useful as better geological and hydrogeological data are obtained.

5.1. ACTIVITÉS SUGGÉRÉES DANS DIVERSES PHASES

Les suggestions présentées ci-après pour les activités de reconnaissances, études et auscultation à entreprendre dans les diverses phases sont basées sur l'expérience. Les activités appropriées et le niveau de détail qu'elles doivent revêtir ne sont pas les mêmes pour tous les projets, et un jugement est donc toujours nécessaire. Par exemple, des reconnaissances et études, telles que l'établissement de cartes, peuvent être nécessaires à diverses étapes du projet ; d'autres activités peuvent ne pas être du tout nécessaires pour un projet particulier.

5.1.1. Phase de pré faisabilité

Une étude destinée à déterminer les dangers de glissement potentiel doit être exécutée à cette étape pour tout projet de retenue. Les opérations nécessaires peuvent être caractérisées comme suit :

1. Exécution d'études au niveau des reconnaissances en vue d'identifier une instabilité existante et un niveau apparent d'activité, au moyen d'interprétation de photos aériennes ou d'images satellitaires, d'examen de cartes topographiques et géologiques et autres informations existantes, et de visites in situ. Les glissements actifs, et même les traces de glissements dormants très anciens, peuvent être généralement reconnus à partir de singularités géomorphologiques et autres visibles sur des photos aériennes, et sont souvent évidents sur des cartes topographiques, bien que de petites particularités puissent être cachées par la végétation ou les activités d'occupation des sols. La représentation plus large (régionale) disponible à partir de rapports, cartes et images satellitaires peut grandement contribuer à l'interprétation des particularités géologiques et géomorphologiques, et à l'explication des causes d'instabilité. Des cartes de dangers concernant une région constituent une excellente source d'informations.
2. Établir une documentation sur l'activité apparente des versants autour de la retenue, en particulier sur les glissements connus. Estimer l'âge et l'histoire géologique de chaque glissement. Définir les besoins et présenter des recommandations pour les travaux ultérieurs.
3. Commencer une auscultation simple (par exemple, contrôle des fissures, des percolations, des déformations).

5.1.2. Phase de faisabilité

Au cours de cette phase, des reconnaissances et études sont entreprises, les objectifs et opérations étant les suivants :

1. Développer la connaissance de la géologie régionale :
 - Déterminer les types géologiques de matériaux et rassembler les caractéristiques géotechniques connues (ou estimées) de chacun d'entre eux,
 - Évaluer l'hydrogéologie et les conditions climatiques,

5.1. SUGGESTED ACTIVITIES IN VARIOUS PHASES

The suggestions made below for investigations and monitoring activities to be undertaken at the various phases are based on experience. Appropriate activities or the detail to which they are performed are not the same for all projects, so judgement is always required. For example some investigation actions, such as mapping, may need to be undertaken at more than one stage of the project ; other investigation activities may not be considered necessary at all for a particular project.

5.1.1. Pre-feasibility phase

A study to determine potential landslide hazards should be made for any reservoir project at this stage. Actions typically required are :

1. Carry out reconnaissance level studies to identify existing instability and apparent level of activity by air photo or satellite image interpretation, examination of topographic and geological maps and other existing information, and field inspection. Active landslides, and even the scars of very old dormant landslides, can usually be recognised from geomorphological and other features visible on aerial photographs and are often evident on topographic maps, although small features may be obscured by vegetation or land-use activities. The broader (regional) picture available from published reports, papers, maps and satellite photographs can greatly assist with interpretation of geological and geomorphological features that may help to explain why there is instability. Regional hazard maps, if available, are an excellent source of information.
2. Document the extent and apparent activity of all slopes around the reservoir, especially known slides. Estimate the age and geological history of each slide. Decide on needs and develop recommendations for further work.
3. Commence simple monitoring (e.g. cracks, seepages, deformations).

5.1.2. Feasibility phase

At this stage, investigations are undertaken with the following objectives and actions :

1. Develop the understanding of the regional geology :
 - Determine geological material types and the known (or estimated) geotechnical characteristics of each,
 - Develop an appreciation of hydrogeology and climatic conditions,

- Examiner les types et variations de végétation, et établir des corrélations avec la lithologie, la structure, l'hydrogéologie et les mouvements de glissement anciens,
 - Considérer la sismicité et les indices régionaux d'instabilité de versant induite par les séismes,
 - Recueillir et étudier des témoignages populaires et des documents historiques, incluant les noms des lieux, qui peuvent fournir des indications sur les problèmes de stabilité dans le temps, et/ou contribuer à identifier des versants antérieurement actifs et à obtenir des informations sur les effets des séismes et des chutes de pluie exceptionnelles,
 - De même, consulter des personnes ou organisations bien informées, telles que des géologues, des compagnies minières, des agences de développement d'infrastructures et des populations locales.
2. Entreprendre une cartographie géologique et géomorphologique préliminaire de la région incluant la zone de la retenue proposée, en vue d'améliorer la connaissance des versants, de leur comportement et de leur âge probable.
 3. Entreprendre une cartographie préliminaire des glissements de terrain identifiés au pourtour de la retenue ; les échelles des cartes dépendront des dimensions/longueur de la retenue et de l'étendue de l'instabilité de versant.
 4. Utiliser ces informations pour déterminer les conditions géologiques et les phénomènes affectant le développement des glissements de terrain dans la région et la zone de retenue.
 5. Examiner les dangers probables présentés par les versants, les conséquences de leur rupture et les scénarios de risque.
 6. Établir des bases de données pour la documentation géologique et les résultats d'auscultation.
 7. Déterminer les besoins et établir des recommandations pour les travaux futurs.

5.1.3. Phases de projet

Les recommandations et études in situ et en laboratoire, aux stades préliminaire et final du projet, sont concentrées sur l'obtention de données nécessaires aux calculs de stabilité et au projet des ouvrages de stabilisation, et peuvent comprendre, en totalité ou en partie, les objectifs et opérations suivants :

1. Identification de la nature de la masse du glissement et de la surface de rupture.
2. Détermination des vitesses et de l'histoire des mouvements.
3. Identification des conditions et pressions de la nappe phréatique.
4. Essais de résistance et/ou d'indice des matériaux de roche ou de sol.
5. Compréhension du mécanisme de rupture des glissements de terrain.

- Examine vegetation types and variations and consider correlations with lithology, structure, hydrogeology and past landslide movements,
 - Consider seismicity and regional evidence for earthquake-induced slope instability,
 - Collect and study folk tales and historical records, including place names, which may provide indications of stability history and/or help identify previously active slopes and give insights into the effect of earthquakes or extreme rainfall events,
 - Similarly, consult knowledgeable individuals or organisations, such as geological surveys, mining companies, infrastructure developers and local inhabitants.
2. Undertake preliminary geological and geomorphological mapping of the region including the proposed reservoir area to improve understanding of the slopes, the likely controls on their behaviour and their probable age.
 3. Undertake preliminary mapping of identified landslides within the reservoir perimeter. Suitable mapping scales will depend on the size/length of reservoir and the extent of slope instability.
 4. Use this information to determine geological conditions and processes affecting landslide development in the region and the reservoir area.
 5. Consider likely slope hazards, consequences of failure and risk scenarios.
 6. Set up databases for geological records and monitoring data.
 7. Determine needs and develop recommendations for further work.

5.1.3. Design phases

Field and laboratory investigations at the preliminary and final design stages are focused on providing input data required for stability analyses and the design of stabilisation works, and may include any or all of the following objectives and activities :

1. Identification of the nature both of the slide mass and the failure surface.
2. Determination of movement rates and history.
3. Identification of groundwater conditions and pressures.
4. Strength testing and/or index testing of rock or soil materials.
5. Understanding the failure mechanism of the landslide(s).

Les opérations spécifiques peuvent comprendre :

Cartographie détaillée

Une cartographie détaillée peut comprendre :

- Préparation de cartes topographiques suffisamment détaillées, englobant toute la zone de glissement existant ou potentiel concernant la retenue.
- Établissement d'une cartographie géotechnique de chaque glissement potentiellement dangereux et des zones apparemment stables, immédiatement adjacentes, afin de porter un jugement sur la stabilité des versants et sur les différences entre versants stables et versants instables. Relever tous escarpements, changements de pente, sources, marques de stratification, failles et zones de cisaillement, diaclases, changements de végétation, inclinaison d'arbres.
- Évaluation des informations cartographiques pour la mise au point des programmes d'auscultation et/ou de reconnaissances et d'études sous la surface du terrain, si de tels programmes sont jugés appropriés.
- Recherche de signes de rupture rapide, ou de mouvements répétés. Essai d'établissement de l'histoire géologique du versant.
- Exécution de dessins de coupes transversales préliminaires en vue de mieux comprendre la géométrie du versant, les surfaces de rupture possible, la répartition des mouvements et l'emplacement des percolations. Cela contribuera à indiquer les endroits où des informations sur le terrain en profondeur permettront une meilleure mise au point du modèle.
- Estimation de la superficie, de la profondeur et du volume de la (des) masse (s) de terrain instable (s) ou potentiellement instable (s).

Reconnaisances in situ

L'identification de la nature de la masse du glissement et de la surface de rupture fera appel aux moyens suivants :

- Exécution de tranchées à travers des escarpements évidents ou supposés, des zones présentant des déformations ou autres accidents géologiques importants (par exemple, des failles), identifiés à partir de la cartographie, en vue d'une mise à découvert et de l'obtention de données pour l'interprétation des résultats d'autres reconnaissances,
- Forages de reconnaissance pour déterminer la nature des matériaux, l'emplacement des surfaces de rupture, les conditions de nappe phréatique,
- Détermination de l'emplacement des forages initiaux à partir des études géologiques, permettant d'établir des coupes transversales fiables, les lobes actifs ou les zones de sources étant évidemment visés,
- Études géophysiques (par exemple, panneaux sismiques, mesures de résistivités),
- Des puits ou galeries permettant l'inspection in situ des matériaux des zones de glissement et de rupture sont particulièrement utiles et peuvent également servir comme dispositifs de drainage,

Specific activities may include :

Detailed mapping

Detailed mapping may involve :

- Preparation of suitably detailed topographic maps that extend across the whole of the area of existing or potential landsliding relevant to the reservoir.
- More detailed engineering geological mapping of each potentially hazardous slide, and apparently stable areas immediately adjacent in order to help develop an appreciation of controls on slope stability and the differences between stable and unstable slopes. Recording all scarps, breaks in slope, springs, bedding or foliation attitudes, faults and sheared zones, jointing, variations in vegetation, tilting or bending of trees.
- Evaluation of mapping information to develop monitoring and/or subsurface investigation programmes if these are deemed appropriate.
- Looking for evidence of rapid failure, or repeated movements. Attempt to develop a geological history of the slope.
- Drawing preliminary cross sections to help develop understanding of slope geometry, possible failure surfaces, distribution of activity, and location of seepages. This will help indicate locations where subsurface information will best assist with model development.
- Estimating the area, depth and volume of the unstable or potentially unstable mass(es).

Field exploration

Identification of the nature of the slide mass and failure surface by :

- Trenching across obvious or suspected scarps, extension zones or other important geological features (e.g. faults) identified from mapping to provide exposure and assist with the interpretation of the results of other investigations,
- Investigation drilling to determine the nature of materials, position of failure surfaces, groundwater conditions,
- Location of initial holes on the basis of geological studies should allow reliable cross sections to be developed, and they should target obviously active lobes or areas upslope from springs,
- Geophysical surveys (e.g. seismic profiling, resistivity surveys),
- Shafts or adits to allow in situ inspection of slide and failure zone materials are particularly useful and may also have value as drainage features,

- Tomographie géophysique ou par caméra de télévision (peut être exécutée dans des forages carottés ou non carottés),
- Prélèvement d'échantillons de tous matériaux datables,
- Essais de perméabilité effectués dans des forages par rotation ou dans des tubes piézométriques, en vue d'obtenir des paramètres pour la modélisation numérique,
- Enregistrement soigné et évaluation des niveaux d'eau au cours du forage.

Auscultation

L'auscultation destinée à déterminer l'évolution et les vitesses des mouvements, ainsi que les conditions de nappe phréatique, est examinée dans les chapitres 5.2 et 10.2, et peut comprendre :

- Installation et relevé de piézomètres et de déformètres dans les forages,
- Installation de dispositifs d'auscultation en surface (dispositifs topographiques de triangulation et de trilatération, mesures GPS, nivellement, contrôle de fissures),
- Inspections visuelles régulières,
- Dans des cas particuliers, installation d'appareils de mesure des émissions micro-acoustiques.

Études en laboratoire

Les études en laboratoire destinées à fournir des paramètres pour le projet comprennent couramment :

- Essais de résistance et/ou d'indices sur des matériaux de roche ou de sol, en concentrant l'attention sur les propriétés des matériaux des zones de faible résistance (surface de rupture),
- Essais ou études des matériaux constitutifs des zones et versants de faible résistance, en vue de connaître leur sensibilité au changement de résistance sous l'effet de la submersion,
- Classification des masses rocheuses et caractérisation des surfaces de cisaillement.

Collecte et analyse des données

Une mise à jour et un examen en temps opportun des bases de données, concernant les observations géologiques et les résultats d'auscultation, constituent une partie cruciale de tout programme de reconnaissances ou d'auscultation.

Toutes excavations (carottes extraites, galeries, tranchées, talus de routes en déblais) seront explorées par un géotechnicien expérimenté, connaissant bien le projet.

Les données fournies par le contrôle des mouvements et de la nappe phréatique seront recueillies et évaluées régulièrement. Cela tient une place très importante dans la mise au point et la validation du modèle.

- Geophysical or TV logging of drillholes (can be undertaken in suitable cored or non-cored holes),
- Specialised sampling of any datable materials,
- Permeability testing carried out in drill-holes or standpipe piezometers to obtain parameters for numerical modelling,
- Careful recording and evaluation of water levels during drilling.

Monitoring

Monitoring to determine movement rates and history, and groundwater conditions, is discussed in Sections 5.2 and 10.2 and may include :

- Installation and monitoring of piezometers and deformation instruments in the drillholes,
- Installation of surface monitoring (triangulation and trilateration surveys, GPS surveys, levelling, simple crack monitoring),
- Regular visual inspections,
- In special cases it may be desirable to install instruments to monitor micro-acoustic emissions.

Laboratory studies

Laboratory studies to obtain parameters for design commonly include :

- Strength testing and/or index testing of rock or soil materials, with emphasis on the properties of weak zone (failure surface) materials,
- Testing or assessment of weak zone and slope forming materials to determine their susceptibility to changes in strength with submergence,
- Rock mass classifications and shear plane characterisation.

Compilation and analysis of data

Timely updating and review of databases for geological records and monitoring data is a crucial part of any investigations or monitoring programme.

All excavations (cores, adits, trenches, road cuts) should be logged by an experienced, well briefed engineering geologist familiar with the project.

Movement and groundwater monitoring data should be collected and evaluated on a regular basis. It is an extremely important part of model development and validation.

Toutes les informations seront reportées avec précision sur des graphiques (vues en plan, coupes transversales). Le rapport identifiera les zones d'incertitude nécessitant des études complémentaires.

Cette documentation fournit maintenant les éléments de base pour la mise au point du modèle et l'établissement d'un programme d'études complémentaires nécessaires à l'amélioration du modèle.

Si nécessaire, des reconnaissances supplémentaires in situ seront programmées en vue d'obtenir les informations nécessaires à une meilleure définition du modèle pour le calcul de stabilité du versant et l'évaluation des risques.

Des appareils d'auscultation supplémentaires peuvent être nécessaires pour contrôler les effets du remplissage de la retenue et/ou des travaux correctifs. Une attention spéciale doit être portée sur la zone de submersion et sur les aquifères dont le drainage peut être assuré par les ouvrages de correction.

5.1.4. Phase de construction

Au cours de la construction de l'aménagement, il est essentiel que toutes nouvelles mises à découvert (excavations en surface, galeries, puits), venues d'eau et carottes de forages soient examinées par un géotechnicien et que les informations recueillies soient utilisées pour valider le modèle géologique. Conjointement, les mesures d'auscultation feront l'objet d'une analyse de routine en vue de déterminer la configuration des déformations et les changements dans les conditions piézométriques résultant des ouvrages de correction.

Ces informations sont capitales pour vérifier que les conditions de terrain et le comportement des versants répondent aux prévisions, et pour effectuer des modifications si nécessaire.

5.2. AUSCULTATION ET DISPOSITIFS DE MESURE

L'auscultation est une partie essentielle des reconnaissances et études géotechniques des versants de retenues. Les programmes d'auscultation peuvent aller d'un niveau très simple (lectures uniquement périodiques) à un niveau très sophistiqué (enregistrement continu d'une variété de paramètres).

Les appareils et méthodes d'auscultation sont ceux couramment utilisés dans les reconnaissances et études de versants, et sont indiqués dans le Tableau 1. Dunicliff (1992, 1998) et Hanna (1985) donnent des détails sur ces appareils de mesure. L'application des appareils de mesure à l'auscultation de versants est examinée dans le document « Transportation Research Board » (1996).

Le choix des appareils de mesure est une importante décision. En particulier, la longévité des appareils doit être prise en considération dans le cas des mesures des mouvements de glissement. Par exemple, les inclinomètres sont des indicateurs très sensibles de mouvements, mais ne peuvent convenir qu'à des mouvements limités de cisaillement.

Les aspects-clés de l'auscultation et l'application de celle-ci au cours des diverses phases des travaux d'aménagement, y compris au cours de l'exploitation, sont examinés dans le chapitre 10.

All information should be plotted accurately on plans and cross sections. The report should identify areas of uncertainty requiring further study.

This documentation is now the basis for model development and planning of further investigations necessary to improve the model.

If required, additional field investigations should be planned to obtain information needed for improved model definition for slope stability analysis and risk assessment.

Additional instrumentation may be required to monitor the effects of lake filling and/or remedial works. Special emphasis will need to be placed on the inundation zone and on aquifers that may be drained by remedial works.

5.1.4. Construction phase

During project construction it is essential that all new exposures (surface excavations, tunnels, shafts), occurrences of water and drill cores be logged by an engineering geologist and the information used to validate the geological model. Concurrently, monitoring records should be routinely evaluated to determine deformation patterns and changes in piezometric conditions in response to the remedial works.

This information is crucial to verify that ground conditions and slope performance are within expectation, and to implement changes if necessary.

5.2. INSTRUMENTATION AND MONITORING

Monitoring is an essential part of the geotechnical investigation of reservoir slopes. Monitoring programs may range from very simple (e.g., only periodic readings) to very sophisticated (continuous recording of a variety of parameters).

The monitoring instruments and methods are those commonly used in slope investigations and are summarised in Table 1. Dunicliff (1992, 1998) and Hanna (1985) provide details of these. The application of instrumentation to slope monitoring is discussed in Transportation Research Board, 1996.

The selection of instruments is an important decision. In particular, the longevity of instruments with slide displacement must be considered. For example, inclinometers are very sensitive indicators of movement but can accommodate only limited shear movement.

The key aspects of monitoring and its application in the typical project phases, including long-term monitoring, are the subject of Chapter 10.

Tableau 1
Méthodes d'auscultation des versants
(extrait de Dunnycliff, 1992)

Paramètres	Dispositifs de mesure/Méthodes
Déformations en surface	Méthodes topographiques, y compris GPS Fissuomètres/extensomètres de surface Inclinomètres Niveaux à eau, à points de mesure multiples Photogrammétrie Images satellitaires Vidéo à distance
Déformations internes	Inclinomètres Mesures de déformation en forage Extensomètres fixés en forage Extensomètres de mesure d'inclinaison Indicateurs de cisaillement Inclinomètres en place Fleximères multiples Auscultation par émission acoustique Réflectométrie dans le domaine du temps (câbles coaxiaux) Pendule Appareils trivec
Pression d'eau souterraine	Tubes piézométriques Piézomètres à corde vibrante Piézomètres pneumatiques Piézomètres à points de mesure multiples
Contraintes dans les ouvrages de renforcement de versant	Cellules de charge Jauges de déformation
Débit de drainage, sources et écoulement de surface	Seau et chronomètre Seuil(s) de mesure Débitmètre en canalisation
Conditions climatiques	Pluviomètres Thermomètres Baromètres Évaporimètres Tensiomètres Jauges de mesure de densité et de profondeur du manteau neigeux
Séismicité	Accéléromètres

Table 1
 Summary of Slope Monitoring Methods
 (adapted from Dunnicliff, 1992)

Parameters	Instruments/Methods
Surface deformation	Surveying methods, including GPS Crack gauges/surface extensometers Tiltmeters Multi-point liquid level gauges Photogrammetry Satellite images Remote video
Subsurface deformation	Inclinometers profiling Simple borehole deformation measurements Fixed borehole extensometers Slope extensometers Shear pin indicators In-place inclinometers (tiltmeters) Multiple deflectometers Acoustic emission monitoring Time-domain reflectometry (coaxial cables) Pendulum Trivec instruments
Groundwater pressure	Standpipe piezometers Vibrating wire piezometers Pneumatic piezometers Multi-point piezometers
Stresses in slope reinforcement	Load cells Strain gauges
Drainage flow, springs and surface runoff	Bucket and stopwatch Water level behind weir(s) Pipe flow meters
Climatic conditions	Rainfall gauges Temperature gauges Barometric pressure gauges Evaporimeter Tensiometers Snowpack depth and density gauges
Seismic events	Accelerometers

5.3. ÉTUDES SISMIQUES

La documentation technique contient de nombreux exemples de glissements de terrain réactivés par des séismes. Une connaissance de la sismicité de la zone de la retenue, incluant le risque de séisme déclenché par la retenue, est donc nécessaire pour l'évaluation de la stabilité du versant et du risque de rupture au cours de séismes.

Dans une zone susceptible de subir des séismes, de précédents indices géologiques peuvent être le principal moyen de déterminer si des mouvements de versants, rapides ou de grande étendue, se sont produits au cours de séismes antérieurs. Avec des études in situ appropriées pour vérifier les contrôles géologiques sur le phénomène de glissement de terrain, de précédents indices peuvent donc contribuer à indiquer s'il y a une forte probabilité que des ruptures de versant surviennent lors de futurs séismes d'intensité élevée.

Les milieux géologiques, dont la stabilité risque le plus d'être affectée par de forts séismes, comprennent des versants raides dans des roches altérées, soumises à des contraintes de cisaillement ou très fracturées, dans des sables, ou dans d'autres sédiments géologiquement récents, ou des versants raides de glace ou de neige.

Keefer (1984) a signalé que les types les plus courants de rupture de versant déclenchée par un séisme étaient des chutes de roche, des glissements de roche, des glissements de sol disloqué et des ruptures rapides sur des versants raides. Ces ruptures sont généralement peu profondes (< 3 m) et peuvent être déclenchées par des phénomènes relativement de faible importance. Keefer a également indiqué que quelques grands glissements préexistants étaient réactivés par des séismes.

Potentiellement, les ruptures de versants les plus dangereuses, déclenchées par des séismes et concernant des retenues, sont des éboulements de roche et des coulées de débris, très importants, rapides et intéressant souvent une grande profondeur. L'étude de Keefer indique que de telles ruptures sont relativement rares au cours de séismes et ne surviennent que dans un domaine limité de conditions géologiques.

Un exemple d'une importante rupture de versant, intéressant une grande profondeur et déclenchée par un séisme, est le glissement rocheux dans le Canyon Madison (Hadley, 1978). Ce glissement de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ se produisit presque immédiatement après la secousse principale, de magnitude 7,1, du séisme Hebgen Lake, du 17 août 1959 (Montana, États-Unis). La rupture était située à 15 km environ de l'épicentre. Les principaux facteurs à l'origine du glissement étaient, d'une part, un versant très instable, constitué de roche altérée et soumise à des contraintes de cisaillement, maintenue par une butée naturelle de dolomie de résistance relativement élevée, et, d'autre part, une importante énergie cinétique produite par le séisme.

Un autre exemple est l'éboulement de roche de Huascaran, en 1970. Il fut déclenché par un séisme ayant pris naissance dans une zone off-shore, au Pérou (Plafker & Ericksen, dans Voight, 1979).

Pour évaluer le risque local, une étude régionale doit être entreprise en vue de comparer des versants de caractéristiques géologiques identiques (matériaux, structure, hauteur de versant, angle de versant) et situés dans des conditions

5.3. SEISMICITY STUDIES

The technical literature contains many examples of landslides activated by earthquakes. Knowledge of the seismicity of the reservoir region, including the potential for reservoir-induced seismicity, is therefore needed for use in the assessment of slope stability and risk of failure during earthquakes.

In a seismicity-susceptible area, geological precedent evidence may be the main means of determining whether large scale or rapid slope movements have occurred during past earthquakes. With appropriate field studies to ascertain geological controls on landsliding, precedent evidence may therefore reasonably be expected to indicate whether there is a strong likelihood that slope failures will occur as a result of any future strong earthquake.

Geological environments more susceptible to destabilisation by large seismic events include steep slopes in weathered, sheared or highly fractured rock, sands or other geologically young sediments, and ice or snow on steep slopes.

Keefer (1984) reported that the most common types of earthquake-induced slope failure were rock falls, rock slides, “ disrupted soil slides ” and rapid failures on steep slopes. These are generally shallow (< 3 m), and may be triggered by relatively small events. Keefer also reported that few pre-existing large landslides are reactivated by earthquakes.

Potentially the most dangerous earthquake-induced slope failures, in the context of reservoir management, are very large, rapid and often deep-seated rock avalanches and debris flows. Keefer's study indicates that such failures are relatively uncommon during earthquakes and only occur under a limited range of geological conditions.

An example of a large, deep seated, seismically induced slope failure is the Madison Canyon rockslide (Hadley, 1978). This 20×10^6 m³ slide occurred almost immediately after the main shock of the magnitude 7.1 Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959 in Montana, USA. The failure was located about 15 km from the epicentre. The principal determining factors of the rockslide were a high mechanically unstable slope of sheared and weathered rock maintained by a natural buttress of relatively strong dolomite, and a large input of kinetic energy from the earthquake.

Another example is the Huascarán rock avalanche of 1970. This was triggered by an off shore subduction zone earthquake in Peru (Plafker & Ericksen in Voight, 1979).

To evaluate local risk, a regional study should be undertaken to compare slopes with similar geological controls (materials, structural controls, slope height, slope angle) and in similar environmental conditions to the reservoir slopes. The objective

environnementales semblables, avec les versants de la retenue en question. Le but est d'identifier l'existence de ruptures de versants et l'existence de barrages formés par d'anciens glissements, dont l'origine peut être attribuée à des séismes. Les versants le long de retenues existantes et de lacs naturels dans la région seront examinés afin d'étudier si les effets de la submersion du pied, de la saturation partielle due aux variations du niveau du plan d'eau et des changements de pressions interstitielles, sur la stabilité sismique peuvent être mis en évidence pour comparaison avec les versants de la retenue.

Des indices géologiques précédents peuvent comprendre des failles actives connues avec évidence de rupture ayant entraîné la formation de glissements de terrain, des caractéristiques géologiques montrant que, bien que des mouvements de faille puissent s'être produits, ceux-ci n'ont pas conduit à des ruptures à grande échelle ou catastrophiques. Par exemple, les études régionales effectuées pour l'aménagement hydroélectrique de Clyde ne décelèrent aucun signe évident de réactivation sismique de glissements dont l'âge de certains pouvait atteindre 250 000 ans ; et pourtant ces glissements sont situés dans une zone sismiquement active, connue pour avoir été sujette à de multiples séismes de forte amplitude (Magnitude de Richter estimée à 7,5) au cours des 15 000 dernières années (Gillon & Hancox, 1992).

Là où des travaux de stabilisation ont été réalisés pour faire face aux effets du remplissage de la retenue (aménagement de Clyde en Nouvelle-Zélande, et aménagements de Revelstoke et de Mica en Colombie Britannique), la constatation que les versants n'avaient pas subi de rupture lors de séismes antérieurs a appuyé le jugement qu'une rupture était improbable lors de séismes futurs.

is to identify the existence of slope failures and old landslide dams possibly attributable to earthquakes. Slopes along existing reservoirs or natural lakes in the region should be examined to assess whether the effects of toe submersion, partial saturation due to lake level fluctuations and changed pore pressures on seismic stability can be ascertained for comparison with the reservoir slopes.

Geological precedent evidence may include known active faults with evidence of rupture that post-dates landslide formation, and geological evidence that although fault movements may have occurred, they have not led to large scale or catastrophic failures. For example, regional studies carried out for the Clyde Power Project found no evidence to clearly indicate seismic reactivation of slides up to 250 000 years old. This was despite their location in a seismically active area known to have been subjected to multiple very large events (estimated up to Richter Magnitude 7.5) within the last 15 000 years (Gillon & Hancox, 1992).

Where stabilisation works had offset the destabilising effects of reservoir inundation at the Clyde Project in New Zealand and the Revelstoke and Mica Projects in British Columbia, the observation that the slopes had not failed in previous earthquakes supported the judgement that failure was unlikely in future earthquakes.

6. ÉTUDE ET CALCUL DES VERSANTS

6.1. MODÈLE DE VERSANT

Des modèles géotechniques de versants sont généralement établis et affinés au cours des diverses étapes des reconnaissances et études des versants, et servent à la mise au point de modèles mathématiques pour les calculs. En général, les modèles géotechniques initiaux présentent de nombreuses incertitudes se reflétant dans les modèles mathématiques qui, de leur côté, ont leurs propres incertitudes. Au fur et à mesure que les reconnaissances et études progressent au cours des diverses étapes, les modèles géotechniques et les modèles mathématiques doivent être améliorés et validés pour la gestion des risques et le contrôle des décisions. Un modèle de mauvaise qualité, ou un modèle qui n'a pas tenu compte des incertitudes, peut rendre totalement dénuée de sens une analyse apparemment sophistiquée.

La mise au point du modèle géotechnique se basera sur la connaissance générale des versants déduite de l'expérience, de la documentation technique internationale et des connaissances locales (telles que les reconnaissances spécifiques). Les versants en question peuvent être généralement comparés avec d'autres versants à travers le monde, ce qui contribue à estimer le comportement local possible.

6.1.1. Types de rupture de versant

Pour la commodité d'évaluation, les ruptures de versants seront classées suivant divers schémas appropriés. Par exemple, selon Cruden & Varnes (1996), les ruptures de versants peuvent être classées et décrites par type de matériau impliqué (roche, détritit ou terre) et par type de mouvement (chute, écroulement, glissement, étalement ou coulée), comme l'indiquent le Tableau 2 et la Fig. 9.

Les chutes, les écroulements et les glissements sont historiquement les types de rupture les plus susceptibles de présenter des dimensions et des vitesses de mouvement suffisantes pour causer un danger à la retenue. Le présent Bulletin considère principalement les glissements de roche et de détritit. Les aspects examinés concernent également d'autres types de rupture de versant.

6.1.2. Développement d'un modèle de versant

Le développement d'un modèle géotechnique qui soit aussi réaliste et fiable que possible, et l'identification du type de rupture affectant un versant nécessitent la détermination :

- Du mécanisme de rupture agissant (ou agissant potentiellement) sur le versant
- Des influences géologiques sur le mécanisme et la géométrie de rupture
- Des propriétés des matériaux
- Des conditions de nappe phréatique (incluant les sources de recharge)
- Des conditions relatives à l'eau de surface.

6. SLOPE ASSESSMENT AND ANALYSIS

6.1. SLOPE MODEL

Geotechnical models of the slopes are usually developed and refined during all stages of the slope investigation and are used in turn to develop mathematical models for use in analyses. Usually the initial geotechnical models contain a great deal of uncertainty that is reflected in the mathematical models, which in turn have their own uncertainties. As the investigations progress through the various stages, both the geotechnical and the mathematical models must be improved and validated for making informed risk management and monitoring decisions. A poor model, or one that has unacknowledged uncertainties, can render an apparently sophisticated analysis totally meaningless.

Development of the geotechnical model should be based on the general knowledge of slopes obtained from experience, international technical literature and local knowledge (such as from specific investigations). Local slopes can usually be compared with other slopes throughout the world. This can greatly assist in judging possible local behaviour.

6.1.1. Types of slope failure

For convenience of assessment, slope failures should be classified using suitable classification schemes. For example, according to Cruden & Varnes (1996), slope failures can be classified and described by the type of material involved (rock, debris or earth) and the type of movement (fall, topple, slide, spread or flow), as summarised by Table 2 and Fig. 9.

Falls, topples and slides are historically the failure types most likely to be of sufficient size, or to occur at a sufficient rate, to be a reservoir hazard. This Bulletin mainly considers rock and debris slides. The principles discussed are equally relevant to other types of slope failure.

6.1.2. Development of a slope model

Development of a geotechnical model that is as realistic and reliable as possible, and recognition of the type of failure affecting a slope, requires understanding of :

- The mechanism of failure acting (or potentially acting) on the slope,
- Geological controls on the failure mechanism and geometry,
- Material properties,
- Groundwater conditions (including recharge sources),
- Surface water conditions.

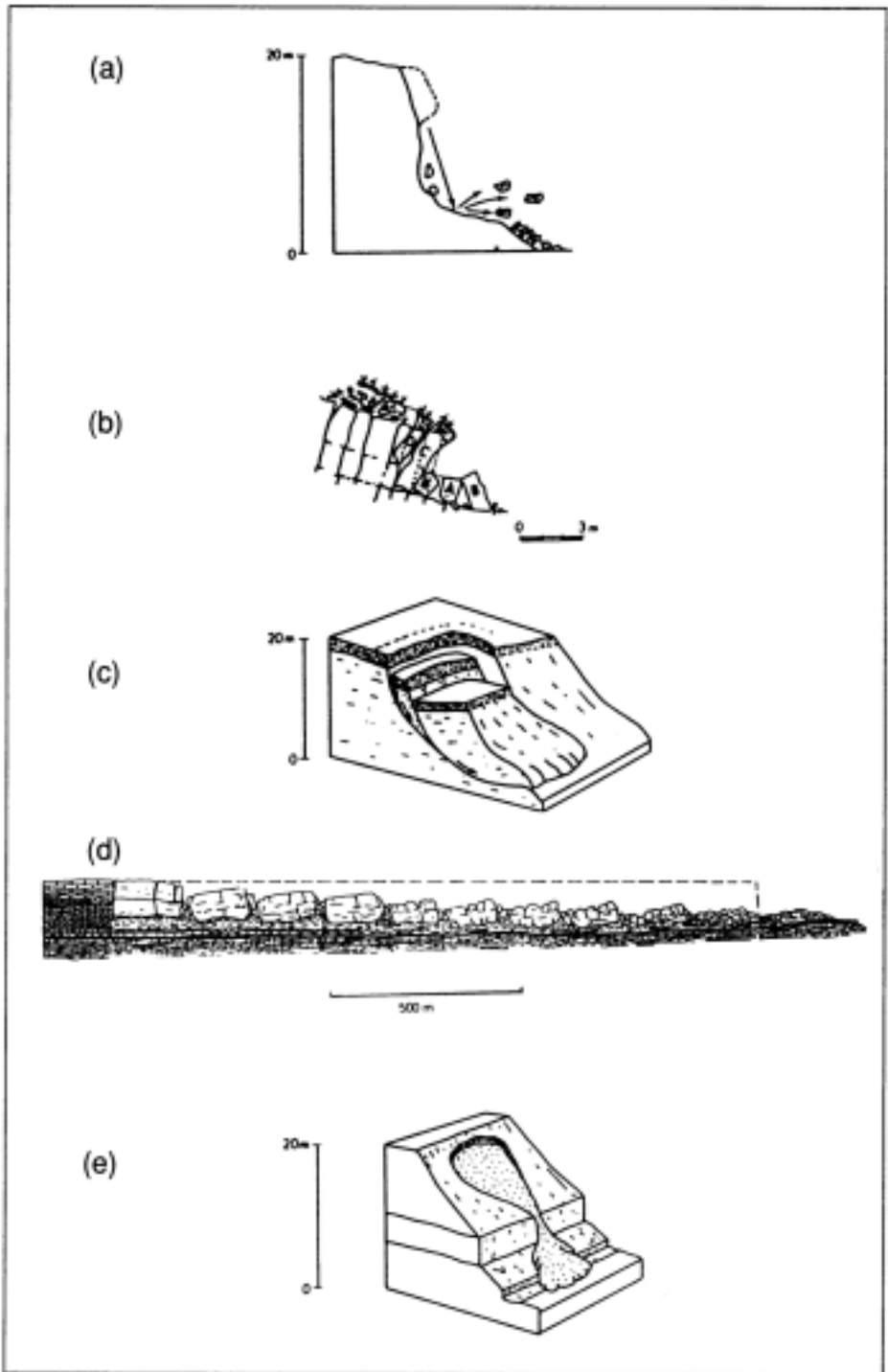


Fig. 9
 Types of slope failure
 (from Cruden & Varnes, 1996)
Types de rupture de versant
 (d'après Cruden & Varnes, 1996)

Table 2
Abbreviated Classification of Slope Movement Types
(after Cruden & Varnes, 1996)

Type of Movement	Type of Material		
	Bedrock	Engineering Soils	
		Predominantly coarse	Predominantly fine
a. Fall	Rock fall	Debris fall	Earth fall
b. Topple	Rock topple	Debris topple	Earth topple
c. Slide	Rock slide	Debris slide	Earth slide
d. Spread	Rock spread	Debris spread	Earth spread
e. Flow	Rock flow	Debris flow	Earth flow

Tableau 2
Classification abrégée des types de mouvement de versant
(d'après Cruden & Varnes, 1996)

Type de mouvement	Type de matériau		
	Roche	Sol	
		Avec prédominance d'éléments grossiers	Avec prédominance d'éléments fins
a. Chute	Chute de roche	Chute de détrit	Chute de terre
b. Écroulement	Écroulement de roche	Écroulement de détrit	Écroulement de terre
c. Glissement	Glissement de roche	Glissement de détrit	Glissement de terre
d. Étalement	Étalement de roche	Étalement de détrit	Étalement de terre
e. Coulée	Coulée de roche	Coulée de détrit	Coulée de terre

La connaissance de l'histoire des mouvements du versant, et d'autres versants dans la région, peut grandement contribuer à la mise au point du modèle.

Les informations nécessaires à l'établissement d'un modèle de versant qui soit aussi fiable que possible comprennent donc :

- Topographie (profil de la surface du terrain)
- Emplacement des escarpements, des percolations/zones humides
- Géométrie de la surface de rupture (en particulier dans la zone affectée par la retenue)
- Conditions de la nappe phréatique (caractéristiques de l'aquifère, confiné ou non confiné, variations du niveau de la nappe)
- Propriétés géotechniques et hydrogéologiques (en particulier, les caractéristiques de résistance et les perméabilités des détritiques de glissement, des matériaux de la zone de rupture, de la roche in situ, des défauts de la masse rocheuse)
- Profondeur de submersion du pied
- Niveaux d'exploitation de la retenue et vitesses de variation du niveau de retenue
- Données sur les déformations (déduites de l'auscultation ou d'indices in situ)
- Réponse piézométrique aux chutes de pluie ou fontes de neige
- Réponse en déformation aux chutes de pluie et variations du niveau de la nappe phréatique.

6.1.3. Considérations analytiques

Le comportement calculé est une donnée importante, mais ne doit jamais être la seule base pour l'étude d'un versant et l'évaluation du danger. Si la modélisation analytique peut être utilisée pour l'obtention d'une évaluation quantitative du comportement d'un versant, sa valeur dépend de la fiabilité du modèle géotechnique du versant, incluant la fiabilité des paramètres de résistance. Si un modèle présente d'importantes incertitudes, sa capacité de prévision sera limitée.

Souvent, des données géologiques et hydrogéologiques fiables sont en nombre insuffisant pour la mise au point d'un modèle géotechnique permettant une analyse significative. Par conséquent, aux diverses étapes des reconnaissances et études, une telle analyse est mieux utilisée pour aider au jugement et contribuer à l'établissement d'un programme de reconnaissances et d'études supplémentaires. Les hypothèses faites doivent toujours s'appuyer sur des documents et être soumises à des analyses de sensibilité.

Le développement interactif des modèles géologiques, hydrogéologiques et analytiques améliorera la compréhension des données et de leurs limitations, ce qui permettra une optimisation des reconnaissances et études du terrain en profondeur, et des dispositifs d'auscultation. Par exemple, des anomalies entre le modèle hydrogéologique et le modèle géologique peuvent être mises en évidence au cours des calculs, ce qui permettra de mieux implanter les forages de reconnaissances

Knowledge of the movement history of the slope, and of other slopes in the area, can greatly assist model development.

Information required to develop a slope model that is as reliable as possible thus includes :

- Topography (for ground surface profile),
- Location of scarps, seepages/wet areas,
- Failure surface geometry (particularly in the area effected by the reservoir),
- Groundwater conditions (aquifer characteristics, whether confined or not, water level fluctuations),
- Geotechnical and hydrogeological properties (specifically the strength characteristics and permeability of slide debris, failure zone materials, in situ rock, rock mass defects),
- Depth of toe inundation,
- Reservoir operating levels and rates of change of reservoir level,
- Deformation data (from monitoring or from field evidence),
- Piezometric response to rainfall or snowmelt,
- Deformation response to rainfall and groundwater level variations.

6.1.3. Analytical considerations

Calculated behaviour is an important input, but should never be seen as the only basis for slope design and hazard assessment. While analytical modelling may be used to provide a quantitative assessment of slope behaviour, its value is limited by the reliability of the geotechnical model of the slope, including the reliability of the strength parameters. Clearly, if there are large uncertainties in a model, it will have limited predictive capability.

Often, there are insufficient reliable geological and hydrogeological data to develop a geotechnical model that will allow meaningful analytical modelling. Consequently, at the various investigation stages, analysis is best used as an aid to judgement and to assist with planning further investigation requirements. Assumptions made must always be documented and subjected to sensitivity analyses.

Interactive development of geological, hydrogeological and analytical models should improve the understanding of the data, and its limitations, allowing optimisation of subsurface investigations and instrumentation. For example, anomalies between the hydrogeological model and the geological model may become evident when attempting analysis, and this may indicate the best place for supplementary investigation drilling. Similarly, prediction of areas of high

supplémentaires. De même, la prévision des zones de niveau piézométrique élevé après le remplissage de la retenue permet d'optimiser l'emplacement des piézomètres et des drains, et peut indiquer les zones de faible perméabilité ou d'accidents géologiques susceptibles d'agir comme surfaces de rupture.

6.2. MODÈLES ANALYTIQUES

Il y a de nombreuses méthodes possibles pour l'évaluation de la stabilité des glissements de terrain, certaines étant plus adaptées aux grands glissements le long de retenues. Les études de stabilité peuvent être effectuées au moyen de méthodes analytiques formelles, soit déterministes, soit probabilistes, mais les résultats doivent toujours être évalués en se basant sur l'expérience et le jugement technique. Toutes les évaluations doivent être confirmées par les résultats d'auscultation et des observations.

Des modèles analytiques **déterministes** peuvent être adoptés lorsque les propriétés des matériaux, les modes de rupture (mécanisme et géométrie) et les forces sont connues avec une précision acceptable. Des changements de coefficient de sécurité absolu ou relatif peuvent être utilisés pour évaluer l'importance des paramètres ou des conditions, et des variations de ceux-ci. Des coefficients de sécurité relatifs, calculés en comparant les analyses antérieures et les analyses postérieures du même modèle de versant, fournissent la meilleure estimation du changement de stabilité résultant de la mise en eau de la retenue.

Des analyses **probabilistes** peuvent être utilisées pour quantifier la probabilité de rupture, à partir de la variation statistique des paramètres d'indices ou des paramètres intervenant comme données d'entrée du modèle (par exemple, chute de pluie, séisme), ou à partir de précédents indices géologiques. Il est nécessaire de considérer les fonctions de probabilité associées aux incertitudes des paramètres (par exemple, propriétés de résistance), ainsi que les fonctions de probabilité associées aux variations dans le temps (par exemple, niveau de retenue).

L'analyse probabiliste est un outil potentiellement valable si elle s'appuie sur la compréhension de précédents indices géologiques et permet une estimation acceptable de phénomènes de déclenchement éventuel. Cependant, dans la plupart des cas, elle ne fournira pas de résultats significatifs au stade des reconnaissances et études, en raison des importantes incertitudes incrémentales (Imrie & Moore, 1997), en particulier dans le cas de versants le long d'une nouvelle retenue, où l'histoire du comportement des versants dans la zone de la retenue n'est pas connue.

La probabilité de rupture dans le temps est un paramètre important. Elle peut être définie si des variables stochastiques, telles que le climat, les chutes de pluie, les séismes, sont prises en compte. Pour les phénomènes de grandes conséquences, la probabilité de rupture est généralement évaluée indépendamment de la durée de vie de l'aménagement.

Si des modèles réalistes sont établis à partir de reconnaissances et d'études bien conçues et exécutées, il y a plus de chances d'obtenir des résultats analytiques réellement bénéfiques pour les prises de décision et le projet des ouvrages de stabilisation. Les modèles doivent faire l'objet d'essais sous divers scénarios, au

piezometric pressure development after lake filling enables optimal positioning of piezometers and drains, and may indicate areas of low permeability or geological features which could act as failure surfaces.

6.2. ANALYTICAL MODELS

There are many possible approaches to landslide stability assessment, some of which are more appropriate when dealing with large landslides along reservoirs. Stability assessments may be carried out by formal analytical procedures, either deterministic or probabilistic, but the results should always be evaluated on the basis of experience and engineering judgment. All assessments must be confirmed by monitoring data and observation.

Deterministic analytical models may be used where material properties, failure modes (mechanism and geometries) and forces are known with reasonable accuracy. Either absolute or relative safety factor changes may be used to evaluate the significance of parameters or conditions, and of variations in these. Relative safety factors, which are calculated by comparing “ before ” and “ after ” analyses of the same slope model, provide the most suitable estimate of the change in stability due to reservoir inundation.

Probabilistic analyses may be used to quantify likelihood of failure from statistical variation of index parameters or model input parameters (e.g. rainfall, earthquake), or from geological precedent evidence. It is necessary to consider both probability functions due to parameter uncertainty (e.g.. strength properties) and probability functions due to variations over time (e.g. reservoir level).

Probabilistic analysis is a potentially valuable tool if based on understanding of geological precedent evidence and a reasonable appreciation of possible triggering events. However, in most cases it will not produce meaningful results at the investigation stage because of the large incremental uncertainties (Imrie & Moore, 1997), especially for slopes along a new reservoir where there is no history of slope behaviour in the reservoir environment.

Failure probability in the time domain is an important parameter. It can be defined if stochastic variables such as climate, rainfall or earthquakes are involved. For high consequence events, the probability of failure is usually assessed independently of the lifetime of the project.

If realistic models are developed from well designed and executed investigations, the likelihood is highest of obtaining analytical results of real benefit for decision-making and engineering design of stabilisation works. The models must be tested under differing scenarios by appropriate parametric and sensitivity

moyen d'analyses appropriées paramétriques et de sensibilité. Un modèle qui apparaît satisfaisant mais qui utilise uniquement des analyses paramétriques pour le contrôle des sensibilités peut donner des résultats analytiques apparemment significatifs, mais restera sérieusement erroné si des informations-clés ne sont pas connues et introduites (par exemple, la présence de pressions d'eau confinée sous un glissement de roche). Pour les glissements de terrain très importants et complexes, il est possible qu'il n'y ait jamais d'informations suffisantes pour définir complètement leur structure ou les conditions de nappe phréatique.

Si les calculs n'indiquent pas une stabilité convenable, une rupture doit être considérée comme possible, et l'amplitude du mouvement et la vitesse potentielle de la masse de terrain doivent être estimées de façon prudente. Le scénario le plus défavorable sera évalué.

6.3. MISE AU POINT DU MODÈLE

Les modèles géométriques initiaux de glissement au pourtour d'une retenue, basés sur des modèles géologiques conceptuels et des données limitées, seront presque certainement simplistes. Cependant, ils peuvent être utilisés pour fournir une évaluation préliminaire des effets du remplissage de la retenue, et seront plus tard affinés au fur et à mesure que davantage de données seront obtenues.

Dans de telles conditions, des analyses de sensibilité, avec variation d'un seul paramètre à la fois, peuvent être effectuées en vue d'identifier les incertitudes critiques nécessitant des recherches ou mesures d'auscultation supplémentaires pour confirmer les jugements.

6.3.1. Paramètres de résistance

Les évaluations de stabilité relative ne sont généralement pas sensibles aux caractéristiques de résistance et de densité adoptées dans la modélisation, à condition que les valeurs choisies soient raisonnablement réalistes.

Pour les coefficients de sécurité absolus, la cohésion effective et la résistance effective au frottement (c' et ϕ') des matériaux soumis à des cisaillements dans des plans de rupture sont des paramètres-clés devant être déterminés de manière fiable. Cela est souvent réalisé au moyen de prélèvements d'échantillons et d'essais en laboratoire, mais ces paramètres peuvent être déterminés de manière plus fiable par analyses en retour s'il s'agit d'un glissement rampant. Dans ce cas, on peut adopter pour le coefficient de sécurité une valeur proche de 1,0.

Dans beaucoup de situations, les échantillons soumis à des essais en laboratoire ne représenteront probablement pas les conditions géologiques in situ. En effet, ils ne peuvent fiablement rendre compte des variations de résistance sur l'étendue d'une surface de glissement, de la présence d'ondulations sur la surface, ou de la dégradation de résistance et de la rupture progressive au cours du glissement de terrain. L'interprétation d'informations publiées sur des exemples indique que dans le cas de glissements importants le long de discontinuités d'une masse rocheuse, les résistances obtenues au moyen d'analyses en retour sont souvent plus élevées que

analyses. A model that appears reasonable but which uses only parametric analyses to test sensitivities may give apparently meaningful analytical results but still be seriously in error if key information is not known and incorporated (e.g. the presence of confined water pressures beneath a rockslide). For very large, complex landslides it is possible that there will never be sufficient information to fully define their structure or groundwater conditions.

If the analyses do not indicate adequate computed stability, failure must be considered possible, and the travel distance and potential velocity for the failure mass need to be conservatively estimated. The worst case scenario should be evaluated.

6.3. MODEL DEVELOPMENT

Initial geometric models of reservoir perimeter slides based on conceptual geological models and limited data will almost certainly be simplistic. However, they can be used to provide a preliminary assessment of the effects of lake filling, and later refined as more data are obtained.

Under such conditions, sensitivity analyses, varying one parameter at a time, can be used to identify the critical uncertainties requiring further investigation or monitoring to confirm judgements.

6.3.1. Strength parameters

Relative stability assessments are not usually sensitive to the strength and density properties used in modelling, provided that the values chosen are reasonably realistic.

For absolute factors of safety, the effective cohesion and frictional strength (c' and ϕ') of the sheared materials forming failure planes are key parameters that need to be reliably determined. This is often done by sampling and testing under laboratory conditions, but these parameters can be more reliably determined by back analyses if a slide is creeping. In this case the Factor of Safety can be taken as nominally approaching 1.0.

In many situations, samples tested under laboratory conditions are unlikely to be representative of in situ geological conditions. This is because they cannot confidently account for variations in strength across the extent of a failure surface, the presence of waviness, or strength degradation and progressive failure during landslide movement. Interpretation of published case history information indicates that in large-scale slides along rock mass discontinuities, back analysed strengths have often been higher than those obtained from laboratory testing of samples considered to be representative of the failure surface. However, the reverse effect

celles déduites des essais en laboratoire sur des échantillons considérés comme représentatifs de la surface de rupture. Cependant, l'effet inverse a été également constaté, par exemple dans le cas de la rupture progressive d'une grande masse. Les effets d'échelle doivent également être pris en compte lors de l'évaluation de la résistance et de la déformabilité des joints de la roche (Giani, 1992).

Les effets d'échelle et d'échantillonnage doivent donc être pris en considération avec soin dans un certain nombre de situations diverses lors de l'application des résultats d'essais.

L'analyse en retour de glissements en activité fournit des valeurs moyennes de résistance pour l'ensemble de la surface de rupture. Si la géométrie du glissement peut être convenablement définie et si la charge piézométrique agissant sur la surface de rupture active est connue, le glissement constitue un essai de cisaillement grandeur nature à partir duquel les paramètres associés c' et ϕ' peuvent être déterminés. Cette approche ne tient pas compte des variations locales éventuelles pouvant affecter de manière significative le comportement d'une partie plus petite du versant.

Il importe de déterminer si, lors de précédents mouvements, des valeurs résiduelles ont été atteintes, ou si une réduction de résistance est encore possible. Le potentiel de perte de résistance et de rupture fragile est d'une importance capitale dans la détermination du risque d'une rupture rapide dans la retenue. Dans le cas de glissements ayant donné lieu précédemment à d'importants déplacements, la cohésion est souvent supposée nulle, et une analyse en retour est effectuée en considérant uniquement la résistance au frottement. Toute hypothèse traduisant que des glissements préexistants ont atteint des valeurs de résistance résiduelle et ne subiront pas de défaillance rapide doit être faite avec circonspection. Vaiont est un exemple de rupture rapide d'un glissement préexistant. Après une longue période de mouvement lent, le glissement s'accéléra pour aboutir à une rupture catastrophique.

Les fissures de traction, avec ou sans pression d'eau, et les effets de coins rocheux doivent être pris en compte, le cas échéant. Suivant le champ des contraintes, des enveloppes de Mohr bi-linéaires, polygonales ou courbes peuvent être le moyen le plus réaliste de tenir compte des changements des contraintes normales le long de la surface de rupture.

6.3.2. Modèle hydrogéologique

La mise au point d'un modèle hydrogéologique conceptuel pour un glissement, et la connaissance des pressions interstitielles de la nappe phréatique agissant à l'intérieur de la masse en glissement et au-dessous de la surface de glissement, sont essentielles si les effets du remplissage de la retenue et des ouvrages techniques doivent être étudiés sur modèle et les résultats utilisés dans les calculs de stabilité. Les conditions de nappe phréatique étant souvent très complexes, les décisions techniques doivent fréquemment s'appuyer sur des modèles simplifiés.

Un drainage « régional » se fait généralement vers les vallées encaissées, avec des chemins d'écoulement déterminés par des fractures et des zones de faible perméabilité. Des accidents de terrain constituent des chemins préférentiels d'écoulement, tandis que des veines argileuses agissent comme des barrières sur les

has also been experienced, for example, with the progressive failure of large masses. Scale effects must also be taken into account when assessing the strength and deformability of rock joints (Giani, 1992).

Scale and sampling effects therefore need to be carefully considered in a number of different situations when applying test data.

Back analysis of moving slides provides average strength parameters for the whole failure surface. Provided that the slide geometry can be reasonably defined and the piezometric pressure acting on the active failure surface is known, the slide provides a full-scale shear test from which c' and ϕ' combinations can be determined. This approach does not allow for the possibility of local variation that may significantly affect the behaviour of a smaller part of the slope.

It is necessary to determine whether previous movements have caused residual values to be reached, or if there is potential for further strength reduction. The potential for strength loss and brittle failure is a primary consideration in determining the potential for a rapid failure into the reservoir. For slides where significant displacement has previously occurred, zero cohesion is often assumed and back analysis is undertaken with frictional resistance only. Any assumption that pre-existing slides have reached residual strength values and will not fail rapidly should be made cautiously. Vaiont is an example of rapid failure of a pre-existing landslide. After a long period of slow movement the slide accelerated to fail catastrophically.

Tension cracks, with or without water pressures, and edge effects must be included or allowed for where appropriate. Depending on stress ranges, bi-linear, polygonal or curved strength envelopes may be the most realistic to account for changes in normal stress along the failure surface.

6.3.2. Hydrogeological model

The development of a conceptual hydrogeological model for a slide, and knowledge of groundwater pore pressures acting within the slide mass and to some depth below slide base, are essential if the effects of lake filling and engineering works are to be modeled and the results used in stability analysis. As groundwater conditions are often very complex, engineering decisions must frequently be based on simplified models.

Regional drainage is usually towards steep valleys, with flow paths determined by fractures and low permeability zones. Extensional features create preferential flow paths, while clayey crushed seams or gouges act as barriers to groundwater flow. Thus, faults may act as a barrier to flow across them but be good conduits for

chemins d'écoulement de la nappe phréatique. Ainsi, des failles peuvent constituer une barrière sur un écoulement de direction transversale à celles-ci, mais être de bons conduits pour un écoulement de direction longitudinale. Les zones de rupture sous-jacentes ou internes d'un glissement de terrain peuvent agir de la même façon. Hendron & Patton (1986) ont considéré que la recharge dans la partie supérieure du versant avait augmenté les pressions de la nappe phréatique, sous le glissement de Vaiont, d'une quantité relativement importante par rapport aux pressions à l'intérieur du glissement. Macfarlane *et al* (1992) ont signalé un vaste champ de conditions de nappe phréatique dans les glissements de la Gorge de Cromwell (Clyde), comprenant des glissements en terrain « sec », des glissements avec nappes phréatiques internes perchées et compartimentées, et des glissements avec pression élevée confinée au-dessous du plan de rupture sous-jacent. Moore & Imrie (1992) examinent les systèmes d'écoulement, de barrière et de compartimentage dans la nappe phréatique de l'Arête Dutchmans.

Des pressions d'eau confinée adjacentes au plan de rupture sous-jacent peuvent causer une plus grande réduction de stabilité que ce qui se produirait dans le cas d'un glissement dans un terrain « sec » ou avec une nappe phréatique perchée, affecté seulement par une saturation au pied. Que de tels effets se réalisent pleinement ou non, cela dépend des caractéristiques des accidents de terrain contrôlant le drainage de l'aquifère confiné. Ces caractéristiques sont souvent difficiles à déterminer de façon satisfaisante, même au moyen de reconnaissances extensives, et représentent une incertitude majeure dans l'évaluation des effets de la nappe phréatique sur la stabilité.

6.3.3. Facteurs climatiques

Une chute de pluie est une variable stochastique qui sera utilisée dans l'étude de probabilité. La connaissance et la compréhension des précipitations, et principalement des infiltrations, sont souvent cruciales dans la mise au point d'un modèle de versant. Il est nécessaire de déterminer si les précipitations à court terme et de forte intensité, ou sur une longue période mais de moindre intensité, et/ou les fontes de neige, ont le plus d'influence sur le comportement de versants particuliers.

L'étude de Hendron & Patton (1986) concernant le glissement de Vaiont a montré que les chutes de pluie enregistrées tenaient une place importante dans l'explication des divers mouvements observés à différentes périodes de remplissage partiel de la retenue. Chaque glissement important était précédé d'une période de fortes précipitations dans les montagnes adjacentes.

Dans le cas du glissement de Cairnmuir (Nouvelle-Zélande), les déformations mesurées lors de précipitations discontinues, mais de forte intensité, conduisirent à la construction d'ouvrages de protection contre les infiltrations et de drainage (Gillon & Saul, 1996).

Les résultats des mesures d'auscultation effectuées, après construction, sur le glissement de Creek n° 5 (Nouvelle-Zélande) ont indiqué que les pressions dans la nappe phréatique sous-jacente et les débits de drainage augmentaient pendant quelques semaines ou quelques mois après des précipitations importantes ou prolongées, avec une période de régression relativement longue (Macfarlane & Jenks, 1996).

flow along them. Basal or internal failure zones of a landslide can act in a similar fashion. Hendron & Patton (1986) postulated that upslope recharge had raised groundwater pressures beneath the Vaiont Slide by a significant amount relative to pressures within the slide. Macfarlane *et al* (1992) reported a wide range of groundwater conditions in the Cromwell Gorge (Clyde) landslides, including dry slides, slides with perched and compartmental internal water tables and slides with high pressure confined below the basal failure plane. Moore & Imrie (1992) discuss carriers, barriers and compartments in the groundwater systems at Dutchmans Ridge.

Confined water pressures adjacent to the basal failure plane can cause a much greater reduction in stability than would occur in a dry or perched water table slide affected only by toe saturation. Whether such effects will be fully realised or not depends on the characteristics of the features controlling drainage for the confined aquifer. These are often difficult to determine satisfactorily, even with extensive investigations, and represent a major uncertainty in assessing groundwater effects on stability.

6.3.3. Climatic factors

Rainfall is a stochastic variable that should be used in probability assessment. Knowledge and understanding of rainfall, and especially of infiltration, is often crucial in developing a slope model. It is necessary to identify whether short term, high intensity, or prolonged but less intense rainfall and/or snow-melt events are the more important controls on the behaviour of individual slopes.

Hendron & Patton's (1986) review of the Vaiont Slide indicated that rainfall records were important in explaining the different movement patterns observed at different periods of partial lake fill. Each major slide movement was preceded by a period of high precipitation in the adjacent mountains.

At Cairnmuir Slide (New Zealand), the monitored deformation response to discrete, relatively small but high-intensity rainfall events led to the construction of infiltration protection and drainage works (Gillon & Saul, 1996).

Post-construction monitoring data from No. 5 Creek Slide (New Zealand) has shown that subbasal groundwater pressures and drainage flows rise for a period of weeks or months following significant or prolonged rainfall events, with a relatively long decay period (Macfarlane & Jenks, 1996).

Des chutes de pluie de forte intensité déclenchent souvent des mouvements dans des versants rocheux altérés ou fracturés, sous l'effet des pressions d'eau introduites.

6.3.4. Vidange rapide

Lorsque le niveau d'une retenue est abaissé, à moins d'une dissipation rapide des pressions interstitielles dans le versant, celui-ci est soumis à de fortes contraintes de cisaillement et à un risque d'instabilité. L'analyse des effets d'une vidange rapide est donc importante dans le cas de retenues sujettes à des variations rapides ou de grande amplitude du niveau du plan d'eau. Les méthodes classiques actuelles pour l'analyse de la stabilité d'un versant au cours d'une vidange rapide de la retenue ont été évaluées par Duncan *et al* (1990).

6.3.5. Stabilité sismique

Diverses méthodes de calcul existent pour estimer l'influence éventuelle des séismes sur des glissements potentiels ou existants. Elles comprennent la méthode pseudo-statique, la méthode Newmark et un certain nombre de méthodes analytiques plus récentes, telles que FLAC, pouvant être utilisées avec des données appropriées. Cependant, leur application est limitée du fait que ces méthodes n'ont pas été vérifiées en se référant à des exemples précédents pour de grands glissements de terrain. Les principales incertitudes dans les calculs de stabilité sismique et de déplacements concernent :

- L'accélérogramme sismique à utiliser, tenant compte des effets locaux, tels que l'amplification topographique
- Les effets des pressions interstitielles
- Les propriétés mécaniques des matériaux sous les charges dynamiques
- La répartition des accélérations sur l'ensemble du glissement au cours du séisme.

Les seuls moyens actuellement disponibles, en vue d'aider au jugement des effets des séismes, sont des comparaisons empiriques. Comme signalé au chapitre 5.3, les études des effets des séismes, telles celles indiquées par Keefer (1984), sont très utiles. Dans la région d'une retenue particulière, de précédents indices géologiques peuvent être le principal moyen de déterminer si des mouvements, de grande amplitude ou rapides, peuvent raisonnablement se produire sous l'effet d'un fort tremblement de terre.

Les méthodes analytiques peuvent servir à montrer que l'accélération de rupture du versant naturel ou du glissement n'a pas été réduite par la retenue, ou (plus vraisemblablement) qu'elle a été réduite par la retenue, mais qu'elle peut être rétablie, si nécessaire, au moyen de mesures techniques.

6.3.6. Distance et vitesse de déplacement

Le modèle de versant fournit des données pour l'estimation du volume d'une rupture potentielle, de la distance approximative de déplacement et de la vitesse probable de la masse du glissement dans le cas d'une rupture.

High intensity rainfall events are often triggers for movement in weathered or fractured rock slopes due to cleft water pressures.

6.3.4. Rapid drawdown

When the water level in a reservoir is lowered, unless the pore pressures within the slope can dissipate quickly, the slope is subject to higher shear stresses and potential instability. Analysis of rapid drawdown effects is therefore important for reservoirs subject to large or rapid variations in water level. Present-day conventional methods for analysing slope stability during rapid drawdown have been evaluated by Duncan *et al* (1990).

6.3.5. Seismic stability

There are various analytical methods for estimating the possible influence of earthquakes on potential or existing landslides. These include pseudostatic analysis, Newmark analysis and a number of more recent analytical methods, such as FLAC, which can be used with appropriate inputs to approximate earthquakes. However, their application is limited as they have not been tested against a background of case histories for large landslides. The main uncertainties in seismic stability and displacement analysis are :

- The earthquake accelerogram to use, taking into account site effects such as topographic amplification,
- Pore pressure effects,
- The material strength properties under dynamic loading,
- The distribution of accelerations over the whole slide during the earthquake.

The only tools presently available to assist with the judgement of earthquake effects are empirical comparisons. As discussed in Section 5.3, surveys of earthquake effects, such as those by Keefer (1984) are very useful. Within the region of a particular reservoir, geological precedent evidence may be the main means of determining whether large-scale or rapid movements may reasonably be expected to occur as a result of a strong earthquake.

Analytical methods may be used to show that the yield acceleration of the natural slope or landslide has not been reduced by the reservoir, or (more likely) that it has been reduced by the reservoir but that it can, if necessary, be recovered with engineering works.

6.3.6. Travel distance and velocity

The slope model provides data for estimating the volume of a potential failure, the approximate reach (travel distance) and the likely velocity of the slide mass in the event of failure.

Sur ces trois paramètres, le plus difficile à estimer est la vitesse du glissement. Beaucoup de facteurs affectent ce paramètre et il doit être évalué avec précaution. Il faut, en particulier, se méfier des matériaux susceptibles de rupture fragile, et des matériaux déformables sous l'effet d'infiltrations avec possibilité de coulée en masse.

Le mécanisme de passage du mouvement lent au mouvement rapide n'est pas encore bien compris. Des études ont été entreprises au barrage Arenos (Espagne) et à d'autres endroits, en vue d'essayer de simuler le comportement de masses glissant dans des retenues et de prévoir les passages à des mouvements rapides (Pastor & Cifres, 1998).

Des études effectuées par Corominas (1996) et d'autres études permettent d'estimer les distances de déplacement de glissements de terrain et d'éboulements de roche, mais ne tiennent pas compte des effets de la rupture dans une retenue.

Wong *et al* (1997) résument une variété de techniques établies pour estimer la distance et la vitesse de glissement de détritiques ; ils fournissent des références-clés pour une explication détaillée des approches et de leur champ d'application, ainsi que des prescriptions relatives aux données de base. En général, il y a trois classes différentes d'approche : les méthodes analytiques basées sur des considérations d'énergie, les méthodes empiriques, et les méthodes numériques basées sur le mouvement d'un milieu continu. À l'exception des méthodes empiriques, les approches précitées peuvent être également utilisées pour une estimation du profil des vitesses.

6.3.7. Séquence analytique

Comme Gillon, Foster *et al* (1992) l'ont décrit, l'approche systématique suivante a été utilisée avec succès pour déterminer des coefficients de sécurité différentiels (relatifs) à l'aménagement de Clyde :

1. Le modèle géologique et hydrogéologique a été défini et la géométrie de la surface de rupture a été identifiée, dans la mesure du possible, à partir de l'interprétation des explorations souterraines et des résultats d'auscultation.
2. Des coefficients de stabilité pour des lobes particuliers et pour l'ensemble du versant ont été calculés en adoptant, soit les résistances des matériaux obtenues à partir d'analyses en retour, soit des valeurs représentatives déduites de versants comparables.
3. Les effets de la montée du plan d'eau de la retenue sur les niveaux de la nappe phréatique ont été estimés et le coefficient de sécurité a été recalculé en vue d'indiquer le changement dans la stabilité par rapport aux conditions préexistantes.
4. Les effets des mesures techniques destinées à améliorer la stabilité ont été introduits dans le modèle et les résultats ont été utilisés comme aide au choix de la méthode.

Les résultats ont été ensuite vérifiés au point de vue de leur sensibilité aux incertitudes du modèle. Celles-ci pouvaient comprendre des variations dans les propriétés des matériaux, des réponses piézométriques différentes au drainage ou au remplissage de la retenue, ou des incertitudes dans la géométrie de la surface de rupture.

Of these three parameters the most difficult to estimate is the slide velocity. There are many factors which affect this parameter and it must be assessed cautiously. It is necessary to be especially wary of materials that may be subject to brittle failure, and of collapsible or contractive materials soaked by infiltration and likely to be susceptible to mass flow.

The mechanism for the transition from slow to rapid movement of landslides is not yet well understood. Studies are being conducted at Arenos Dam (Spain), and at other places also, attempting to simulate the behaviour of masses sliding into reservoirs, and trying to forecast transitions to rapid movement (Pastor & Cifres, 1998).

Studies by Corominas (1996), and others, allow estimates of travel distance for landslides and rock avalanches but do not take into account effects of failure into a reservoir.

Wong *et al* (1997) summarise a variety of techniques that have been developed to estimate the travel distance and velocity of landslide debris, and they provide key references for a detailed explanation of the approaches and their scope of application and requirements on input data. In general, there are three different classes of approach: analytical methods based on energy considerations, empirical methods, and numerical methods based on the motion of a continuum. Except for the empirical methods, the above approaches can be extended to provide an estimate of the velocity profile.

6.3.7. Analytical sequence

As described by Gillon, Foster *et al* (1992) the following systematic approach was successfully used to determine differential (relative) safety factors at Clyde :

1. The geological and hydrogeological model was defined and the failure surface geometry was identified as far as possible from interpretation of subsurface exploration and investigative monitoring data.
2. Stability factors for individual lobes and for the entire slope were calculated using either back-analysed material strengths or representative values adopted from comparable slopes.
3. The effects of lake raising on groundwater levels were estimated and the safety factor recalculated to indicate the change in stability relative to pre-existing conditions.
4. The effects of engineering works to enhance stability were introduced to the model and the results used to aid in the choice of method.

The results were then tested for sensitivity to uncertainties in the model, where applicable. These could include variation in material properties, different piezometric responses to drainage or lake filling, or uncertainties in the failure surface geometry.

Ce processus nécessite généralement d'être répété à diverses étapes au cours de la mise au point du modèle de versant.

6.4. RÉSULTATS

L'aboutissement des reconnaissances et études in situ et de la mise au point du modèle est un modèle de versant, qui est utilisé pour :

1. Évaluer la réponse future probable du versant à la mise en eau et à l'exploitation de la retenue.
2. Évaluer la sensibilité du versant aux incertitudes concernant diverses variables, telles que la géométrie de la surface de rupture, les propriétés des matériaux, les conditions de nappe phréatique, ou les charges exceptionnelles (par exemple, les charges sismiques).
3. Déterminer les niveaux de retenue critiques pour chaque segment ou lobe de glissement (le cas échéant).
4. Évaluer les effets de mesures de correction éventuelles.

Les réponses du versant au remplissage et à l'exploitation de la retenue sont estimées en considérant divers facteurs, à savoir :

- Type de glissement affectant le versant : existant ou potentiel
- Configuration du mouvement en cours et passé
- Volume de matériaux pouvant être entraînés dans une rupture
- Possibilité de perte de résistance (résistance des matériaux, facteurs géométriques, etc.)
- Potentiel de rupture rapide
- Distance et vitesse de déplacement possibles
- Variation du coefficient de sécurité du versant non modifié, résultant de la retenue
- Réponse probable aux variations du niveau de retenue
- Potentiel du versant à une autostabilisation en cours de mouvement
- Modifications du coefficient de sécurité résultant des diverses variantes de correction.

Ces réponses de versant sont utilisées dans les calculs hydrauliques, dans le cas d'obstruction de vallée et d'ondes de translation, pour l'évaluation globale des risques d'instabilité de versant et, si une atténuation est nécessaire, pour le choix des mesures correspondantes.

6.5. VÉRIFICATION DU MODÈLE

La vérification du modèle est importante pour les stratégies de gestion et d'auscultation à long terme. La mise en eau d'une retenue est une période de la plus haute importance du fait qu'elle permet la première vérification réelle du modèle. Les réponses dans les domaines de la piézométrie et des déformations seront

This process usually needs to be repeated at various stages as the slope model is developed.

6.4. OUTCOMES

The outcome of field investigations and model development is a model of the slope, which is used to :

1. Assess the likely future response of the slope to lake filling and operations.
2. Assess the sensitivity of the slope to uncertainties in a variety of other variables such as failure surface geometry, material properties, groundwater conditions, or abnormal loadings (e.g. earthquake).
3. Determine critical lake levels for each segment or lobe of the slide (if applicable).
4. Assess the effects of possible remedial measures.

Slope responses to reservoir formation and operations are estimated by considering a variety of factors, including :

- Whether the slope is an existing or potential slide,
- Current and past movement behaviour,
- The volume of material that may be involved in a failure,
- Whether loss of resistance is a possible issue (material strength, geometrical factors, etc.),
- Potential for rapid failure,
- Possible travel distance and velocity,
- The change in factor of safety of the unmodified slope due to the lake,

- The likely response to varying lake levels,
- The potential of the slope to self-stabilise with movement,
- Changes in factor of safety due to various remedial options.

These slope responses are used in hydraulic analyses for valley blockage and impulse waves where applicable, in the overall assessment of slope stability risks to the project and, if mitigation is required, in the choice of mitigation measures.

6.5. MODEL VERIFICATION

Verification of the model is important to long-term management and operational monitoring strategies. Lake filling is a period of key significance as it provides the first real test of the model. Piezometric and deformation responses will be needed for model confirmation and for confirming the effectiveness of

nécessaires pour la confirmation du modèle et de l'efficacité des travaux de stabilisation (le cas échéant). Dans certains cas, les résultats d'auscultation obtenus au cours de la mise en eau de la retenue permettront la première vérification de parties du modèle (par exemple, dans le cas où il y a plusieurs aquifères à l'intérieur ou sous le glissement).

Un programme de remplissage par étapes aide grandement à évaluer les réponses et à vérifier que le comportement du glissement est conforme aux prévisions, ou, dans le cas contraire, à prendre des mesures de correction. La durée de chaque stabilisation de la retenue dépendra de facteurs tels que le temps nécessaire à la mise en équilibre de la nappe phréatique avec les variations du niveau de retenue, la détermination de la réponse du glissement à la progression de la submersion, et le temps requis pour recueillir les données et analyser les changements et le comportement. Les différences significatives par rapport aux réponses prévues doivent être comprises et, si nécessaire, faire l'objet de mesures de traitement avant poursuite de la montée du niveau de retenue.

Si les résultats obtenus au cours du remplissage de la retenue ne sont pas conformes aux indications des modèles établis, les résultats doivent être vérifiés, les modèles révisés et les divers changements définis et compris. Une gestion efficace à long terme et une exploitation sûre de la retenue ne sont possibles que si les modèles sont fiables.

stabilisation works (if employed). In some cases, monitoring data obtained during lake filling will provide the first check of parts of the model (e.g. whether there are multiple aquifers within or beneath the slide).

A staged filling programme greatly assists in evaluation of responses and to ensure that slide behaviour is consistent with expectations, or to allow a remedial action where this is not the case. The length of time at each hold point will depend on such factors as the time required for equilibration of groundwater with lake level increments, determination of the slide response to the increased inundation, and the time required to document and review the changes and performance. Significant differences from expected responses must be understood and if necessary remediated before further raising the reservoir.

If data obtained during lake filling are not consistent with the models developed, the data must be checked, the models revised and the significance of any changes determined and understood. Effective long-term management and safe operation of the reservoir are possible only if the models are reliable.

7. ONDES DE TRANSLATION ET OBSTRUCTION DE LA VALLÉE

Le niveau de retenue et la vitesse de variation de ce niveau sont des données nécessaires pour évaluer la stabilité des versants d'une retenue et les conséquences de toute rupture rapide d'un grand glissement adjacent à la retenue. Les dimensions et l'étendue possibles des ondes de translation ou les effets de l'obstruction de la vallée résultant de glissements de terrain doivent être évalués pour les analyses des conséquences et les prises de décisions en vue de la réduction des risques.

7.1. ONDES DE TRANSLATION

Une importante et rapide rupture d'un versant de roche, de terre, de neige ou de glace atteignant une retenue peut engendrer une onde de translation susceptible de causer des dégâts bien au-delà de la zone du glissement. Des glissements subaquatiques peuvent également produire une onde. Dans des cas graves, les ondes peuvent causer des dégâts aux communautés et aux infrastructures situées à l'amont et en bordure de la retenue, et déverser sur le barrage, étendant les dommages à l'aval.

Au fur et à mesure que la retenue se remplit, la probabilité de rupture de versant augmente. Cela est dû à l'augmentation du nombre de glissements réels et potentiels submergés, ainsi qu'à l'augmentation de la profondeur de submersion.

En outre, comme la revanche diminue au cours du remplissage, le potentiel de déversement sur le barrage et de dommages au-dessus du contour final de la retenue augmente également.

Le volume d'eau déplacé par un glissement de terrain influe sur la hauteur de l'onde de translation. Outre les conséquences dynamiques, le niveau statique de la retenue augmentera dans le cas de volumes d'eau importants déplacés et de surfaces de plan d'eau relativement petites.

La profondeur d'eau est le facteur déterminant influant sur la hauteur des ondes produites. Une masse de terrain plongeant dans une retenue profonde induira des ondes de translation moins hautes que dans le cas d'une masse de même volume plongeant dans une retenue peu profonde.

Par conséquent, du fait que la probabilité de rupture de versant et ses conséquences, ainsi que les ondes de translation associées, changent au fur et à mesure que la retenue se remplit, il est nécessaire d'évaluer ces risques en fonction du niveau de retenue.

L'atténuation de la hauteur des ondes dans des retenues recouvertes de glace dépend de l'épaisseur de la couche de glace et de la période de l'onde (Carter *et al*, 1981 ; Dalya, 1993). La période longue et l'énergie élevée des ondes de translation font que généralement l'effet de la couverture de glace sur l'atténuation des ondes peut être négligé. Le long des rives ou en face d'un barrage, les ondes de translation peuvent soulever, rompre la couverture de glace et déferler.

7. IMPULSE WAVES AND VALLEY BLOCKAGE

Reservoir level and the rate of reservoir level change are required inputs for assessing the stability of reservoir slopes and the consequences of any rapid failure of a large landslide adjacent to a reservoir. The potential size and extent of impulse waves or valley blockage effects from landslide failures are required for consequence analyses and decisions on risk mitigation.

7.1. IMPULSE WAVES

A large and rapid rock, soil, snow or ice slope failure into a reservoir can generate an impulse wave that can cause damage far beyond the slide area. Underwater slides may also be capable of generating a wave. In severe cases, waves can damage upstream and lakeshore communities and infrastructure, and overtop dam structures extending damage to downstream communities and infrastructure.

As the reservoir fills, the likelihood of slope failure increases. This is due both to the increasing number of actual and potential slides inundated and to the increasing depth of inundation.

In addition, as the freeboard reduces during filling, the potential for overtopping the dam and for damage above the final shoreline also increases.

The volume of water displaced by a landslide affects the potential impulse wave height. In addition to the dynamic consequences, the static reservoir level will increase for large water displacements and relatively small water surfaces.

The depth of water is the determining factor in the height of generated wave(s). In deep water, a plunging slide mass will induce lower impulse waves than a mass of the same volume plunging into a reservoir with shallow water.

Therefore, as both the likelihood and the consequences of slope failure and any associated impulse waves alter as the reservoir fills, it is necessary to assess these risks as a function of the reservoir level.

Wave height attenuation in ice-covered lakes depends on the thickness of the ice layer and on the wave period (Carter *et al*, 1981; Dalya, 1993). The long period and high energy of impulse waves generally means that the effect of ice cover on wave attenuation can be neglected. Along the shore or in front of a dam, impulse waves may lift and break up the ice cover and run up.

7.1.1. Exemples historiques d'ondes de translation

Il y a plusieurs exemples, bien documentés, d'ondes de translation qui se sont produites dans des lacs, des retenues ou des rivières profondes. On peut citer :

- Les glissements de roche dans le Lac Loen (ouest de la Norvège), en 1905, 1936 et 1950, qui engendrèrent des ondes de translation, respectivement de 40,5 m, 74 m et 12-15 m de hauteur (Bjerrum & Jørstad, 1968 ; Jørstad, 1968). Les événements de 1905 et 1936 causèrent d'importants dégâts et pertes de vies humaines le long du lac.
- Le glissement de Vaiont (nord de l'Italie), en 1963, où une onde estimée à plus de 100 mètres de hauteur déversa sur le barrage, l'onde de crue à l'aval dévastant la ville de Longarone (Kiersch, 1988) et d'autres villages dans la vallée de Piave. À l'amont, des dégâts furent causés au village de Casso par un violent souffle d'air, et le village d'Erto fut inondé, ces deux villages étant situés le long de la retenue.
- Le glissement de Tangyanguang dans la retenue de Zaxi (Chine), en 1961, qui engendra des ondes de 21 m de hauteur en face du glissement, la profondeur de la retenue étant de 50-70 m ; des ondes de 3,6 m de hauteur déversèrent sur le barrage situé à une distance de 1,55 km à l'aval. Des ondes de 1,2-1,5 m de hauteur furent observées 8 km à l'amont du glissement, leur hauteur étant réduite à 0,3-0,5 m à une distance de 15 km à l'amont du glissement. La vitesse du glissement fut estimée à 20 m/s (Jing & Wang, 1988).
- Le glissement de Xintan dans le fleuve Yang Tsé (Chine), en 1985, qui produisit une onde de translation de 49 m de hauteur en face du glissement. Les ondes se propagèrent vers l'amont et vers l'aval en s'atténuant, et disparurent à une distance de plus de 20 km. À Xiangxi, ville située à 5 km à l'amont de Xintan, la hauteur de l'onde atteignait 7 m (Liu, 1988).
- Nombreux glissements et ondes associées sur la retenue Roosevelt, derrière le barrage Grand Coulee (Jones *et al*, 1961).

D'autres ondes de translation notables ont été enregistrées, lors de chutes de roche et de glace dans des fjords norvégiens (Jørstad, 1968), d'une chute de glace dans la Baie Disenchantment (Alaska), et d'une chute de roche dans la Baie Lituya (Alaska) (Miller, 1960).

7.1.2. Estimation des hauteurs des ondes de translation possibles

Une évaluation détaillée et fiable des hauteurs des ondes de translation possibles autour d'une retenue et au parement amont d'un barrage nécessite une modélisation physique et mathématique coûteuse (Huber & Hager, 1997). Des exemples de modèles physiques ont été signalés par Pugh & Harris (1982) pour le barrage et la retenue Morrow Point, et par Chaudhry *et al* (1983) pour le glissement Downie.

Dans le cas de la retenue Morrow Point, trois zones de glissement potentiel couvrant un tronçon de 5,3 km à l'amont du barrage furent étudiées sur modèle. Les hauteurs des ondes de déversement, les durées d'écoulement et les volumes possibles furent déduits des essais sur modèle. Pour le glissement Downie, un modèle physique fut utilisé pour obtenir la forme et la hauteur des ondes générées,

7.1.1. Historical examples of impulse waves

There are many well-documented examples of impulse waves that have occurred in lakes, reservoirs or deep rivers.

- Rock slides into Lake Loen, western Norway, in 1905, 1936 and 1950 generated impulse waves 40.5 m, 74 m and 12-15 m high respectively (Bjerrum & Jørstad, 1968; Jørstad, 1968). The 1905 and 1936 events caused significant damage and loss of life along the lake.
- The 1963 Vaiont slide (northern Italy) where a wave estimated to be in excess of 100 metres high overtopped the dam, with the subsequent flood wave devastating the downstream town of Longarone (Kiersch, 1988) and other downstream villages in the Piave Valley. Upstream effects included air blast damage to the village of Casso and flooding at the village of Erto, both located along the reservoir.
- Tangyanguang Slide into the Zaxi Reservoir in China in 1961, which created wave heights of 21 m opposite the slide when the reservoir was 50-70 m deep and resulted in 3.6 m high waves that overtopped the dam, 1.55 km downstream. Wave heights of 1.2-1.5 m were recorded 8 km upstream of the slide, reducing to 0.3-0.5 m at a distance of 15 km upstream of the slide. The slide velocity was estimated to be as much as 20 m/s (Jing & Wang, 1988).
- Xintan Slide into the Yangtze River in China, 1985, which created a 49 m high impulse wave opposite the slide. The surging waves spread upstream and downstream with attenuation and disappeared at a distance further than 20 km away. At Xiangxi, a town 5 km upstream from Xintan, the waves were 7 m high (Liu, 1988).
- Numerous slides and associated waves on Roosevelt Reservoir behind Grand Coulee Dam (Jones *et al*, 1961).

Other recorded notable impulse wave events have resulted from rockfalls and icefalls into Norwegian fjords (Jørstad, 1968), an icefall in Disenchantment Bay, Alaska, and a rockfall in Lituya Bay, Alaska (Miller, 1960).

7.1.2. Estimating potential impulse wave height

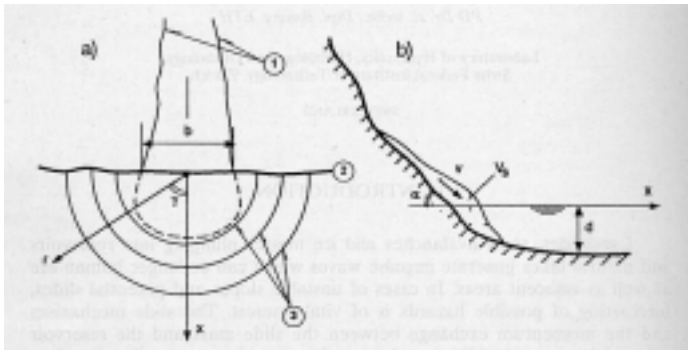
Reliable and detailed assessment of potential impulse wave heights around a reservoir and at a dam face inevitably requires expensive physical and mathematical modelling (Huber & Hager, 1997). Examples of physical models have been reported for Morrow Point dam and reservoir by Pugh & Harris (1982) and for the Downie Slide by Chaudhry *et al* (1983).

For Morrow Point reservoir, three potential slide areas covering a reach extending 5.3 km upstream from the dam were modeled. Potential overtopping wave heights, flow durations and volumes were derived from the model test. For the Downie Slide, a physical model was used to obtain the shape and height of slide-generated waves near the slide. Mathematical studies then simulated the

près du glissement ; des études mathématiques ont simulé la propagation des ondes à partir du glissement, à l'amont jusqu'au barrage Mica et à l'aval jusqu'au barrage Revelstoke ; un second modèle physique de la retenue adjacente au barrage Revelstoke fut établi pour évaluer le déferlement de l'onde sur le barrage.

Huber & Hager (1997) ont décrit des méthodes simplifiées de prévision des ondes de translation, faisant intervenir des modèles physiques bidimensionnels et tridimensionnels, les essais étant effectués dans des bassins en vue de prendre en considération l'extension de l'onde latérale. Ces méthodes simplifiées permettent d'évaluer les hauteurs des ondes engendrées par un glissement de terrain, et d'estimer l'atténuation des ondes longitudinalement ou transversalement à la retenue, ainsi que le déferlement sur les rives ou sur le parement amont du barrage.

Dans le cas de glissements rapides, avec des vitesses atteignant au moins 50 % de la célérité de l'onde (1), des essais sur modèle en canal et en bassin ont montré que la hauteur sans dimension de l'onde H/d dépendait principalement du nombre affecté au mouvement de glissement et défini sous la forme $M = V_s/bd^2$: V_s est le volume du glissement pénétrant dans la retenue (i.e. le volume d'eau déplacé, en m^3), b la largeur du glissement, et d la profondeur d'eau devant le glissement (en m), comme l'indique la Fig. 10. La hauteur de l'onde dépend également du rapport des densités matériau du glissement/eau (ρ_s/ρ_w), de l'angle d'impact (α), et de la distance de parcours sans dimension (x/d) de l'onde.



Dans des canaux et des longues retenues, la relation donnant la hauteur sans dimension de l'onde est :

$$\frac{H}{d} = 0,88 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V_s}{bd^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{x} \right)^{\frac{1}{4}} \sin \alpha$$

(1) Célérité = vitesse de propagation de l'onde.

propagation of waves from the slide upstream to Mica Dam and downstream to Revelstoke Dam. A second physical model of the reservoir adjacent to Revelstoke Dam was built to assess wave runup on the dam.

Huber & Hager (1997) have described simplified methods of impulse wave forecasting based on 2-D physical modelling and 3-D physical modelling, conducted in pools to consider lateral wave extension. Their simplified methods allow assessment of generated wave heights adjacent to a landslide, and also allow the attenuation of the waves along or across a reservoir, including runup effects at the shore or dam upstream face, to be estimated.

For rapid slides with velocities of at least 50 % of the wave celerity (1), model tests in flumes and pools have shown that the dimensionless wave height H/d depends mainly on the slide displacement number, defined as $M = V_s/bd^2$. Here V_s is the slide volume falling into the reservoir (i.e. the volume of water displaced, in m^3), b is the slide width (m), and d is the water depth in front of the slide (m), as indicated in Fig. 10. The wave height is also a function of the density ratio of the slide material and water (ρ_s/ρ_w), the impact angle (α), and the dimensionless travel distance (x/d).

Fig. 10

Slide layout (a) and section (b) with the main parameters of an impulse wave
(from Huber & Hager, 1997)

*Vues schématiques, en plan (a) et en coupe (b), d'un glissement, avec indication des paramètres principaux utilisés dans la description des ondes de translation
(d'après Huber & Hager, 1997)*

- | | |
|---|---|
| 1. Slide borders | 1. Bords du glissement de terrain |
| 2. Reservoir shore | 2. Rive de la retenue |
| 3. Impulse waves propagating in semicircles | 3. Ondes de translation se propageant en demi-cercles |

In flumes and long reservoirs the dimensionless wave height relation is In flumes and long reservoirs the dimensionless wave height relation is :

$$\frac{H}{d} = 0.88 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{V_s}{bd^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{d}{x} \right)^{\frac{1}{4}} \sin \alpha$$

(1) Celerity : velocity of propagation of the wave.

Dans des bassins, la direction de propagation γ est un paramètre supplémentaire. La distance de propagation est remplacée par le rayon r mesuré à partir du centre d'impact du glissement et l'équation, déduite de résultats d'essais, devient :

$$\frac{H}{d} = 1,76 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V_s}{bd^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{r} \right)^{\frac{2}{3}} \sin \alpha \cdot \cos^2 \left(\frac{2\gamma}{3} \right)$$

Les méthodes simplifiées destinées à estimer l'atténuation de la hauteur de l'onde avec la distance ont un domaine de validité, basé sur des résultats d'essais, de $x/d < 100$ pour les études bidimensionnelles, et de $r/d < 30$ pour les études tridimensionnelles. Hunt (1988) a présenté une solution numérique qui étend l'étude bidimensionnelle au-delà d'une valeur de 100 pour x/d .

7.1.3. Déferlement de l'onde

Lorsqu'une onde de translation heurte directement une rive de retenue ou le parement amont d'un barrage, elle change de nature et devient une onde de crue qui déferle sur la rive ou sur le parement (Huber & Hager, 1997). La hauteur de déferlement peut atteindre 2,5 fois la hauteur de l'onde lorsqu'elle était au large. Il importe de considérer le déferlement de l'onde lorsqu'on étudie la zone de rive mise en danger ou la possibilité de déversement sur le barrage. Les effets d'un déferlement d'onde sur le parement incliné d'un barrage en remblai sont différents de ceux concernant le parement presque vertical d'un barrage-poids ou d'un barrage-voûte.

7.1.4. Déversement sur le barrage

Une onde de translation qui déverse sur un barrage peut causer des dégâts à l'aval par suite de l'onde de crue qui en résulte et des chocs contre des ouvrages, par exemple une usine hydroélectrique située au pied du barrage. Vaiont est un exemple bien connu.

Il faut également considérer la possibilité d'ouverture d'une brèche dans le barrage lors du déversement. Cela peut résulter d'un mécanisme d'instabilité affectant le barrage ou d'une érosion de la crête du barrage ou du brise-lames. Si une telle brèche est possible, il y a lieu d'effectuer une étude de rupture de barrage pour évaluer les conséquences à l'aval. Le Bulletin CIGB n° 111 (1998) traite des procédures d'étude d'onde de rupture de barrage.

Une revanche suffisante est le moyen évident de protection contre les dangers de déferlement des ondes, d'inondation et de déversement des ondes de translation sur le barrage. Des déflecteurs d'ondes sur des barrages en béton peuvent également maîtriser le déferlement des ondes. Muller (1995) fournit une longue liste de références concernant le déferlement et le déversement d'ondes.

7.2. OBSTRUCTION DE LA VALLÉE

Il y a de nombreux exemples bien documentés de ruptures de versants suffisamment importantes pour obstruer des vallées et créer des barrages dans des

In pools, propagation direction γ is an additional parameter. The propagation distance is replaced by the radius r measured from the slide impact centre and the equation, derived from test results, becomes :

$$\frac{H}{d} = 1,76 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{V_s}{bd^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{d}{r} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \left(\frac{2\gamma}{3} \right)$$

Simplified methods for estimating attenuation of wave height with distance have a range of validity based on test results of $x/d < 100$ for 2-dimensional situations and $r/d < 30$ for 3-dimensional studies. Hunt (1988) produced a numerical solution that extends the 2-dimensional situation beyond x/d of 100.

7.1.3. Wave runup

When any impulse wave impinges directly onto a shoreline or the upstream face of a dam, it changes its character and becomes a flood wave that runs up the shore (Huber & Hager, 1997). The flood wave runup height can be up to 2.5 times the height of the wave when it was offshore. Wave runup needs to be considered when assessing the endangered shore zone or the potential for dam overtopping. Wave runup effects for the sloping face of an embankment dam are different from those at the near vertical faces of gravity or arch dams.

7.1.4. Dam overtopping

An impulse wave that overtops a dam can cause damage downstream of the dam from the resulting flood wave and impact damage to any structures, such as a powerhouse, that may be located at the toe of the dam. Vaiont is a well-known example.

Consideration must also be given to the possibility that the overtopping wave may initiate a dam breach. This can be either from an instability mechanism involving the dam or by erosion of the dam crest or groyne. If a dam breach is possible then a dam break study will be required to assess the downstream consequences. ICOLD Bulletin No 111 (1998) provides information on procedures for dam break flood analysis.

Adequate freeboard is the obvious protective measure against hazardous wave runup, flooding and dam overtopping by impulse waves. Wave deflectors on concrete dams can also contain wave runup. Muller (1995) provides an extended list of references for wave runup and overtopping waves.

7.2. VALLEY BLOCKAGE

There are numerous documented examples of slope failures large enough to block valleys and create landslide dams in mountainous areas (Schuster & Costa,

zones montagneuses (Schuster & Costa, 1986). Un grand nombre de glissements historiques et préhistoriques ont constitué des remblais stables, comme l'indique la diversité de lacs créés derrière ces barrages résultant de glissements (par exemple, Bromhead *et al*, 1996). Cependant, une grande proportion des barrages créés par des glissements subit une rupture peu de temps après, par suite d'un déversement non maîtrisé ou parfois d'une érosion interne (Schuster & Costa, 1986). Ces barrages sont principalement caractérisés par la présence d'une grande quantité d'éléments fins dans les détritiques de glissement.

Parmi les exemples importants d'obstruction de vallées par des glissements de versants dans des retenues existantes, ou les affectant, on peut citer :

- Le glissement catastrophique de Vaiont, en 1963, dans le nord de l'Italie,
- Le glissement La Josefina, en 1993, à l'amont de la retenue Paute, Équateur (Chamot, 1994 ; D'Ercole, 1996),
- Le glissement Ontake, en 1984, au Japon, déclenché par un tremblement de terre (Duffaut, 1987).

7.2.1. Conséquences de la création de barrages par des glissements de terrain

Les barrages créés par des glissements de terrain peuvent élever le niveau d'eau amont au-dessus du niveau maximal normal de la rivière ou de la retenue, et inonder des communautés à l'amont. Le niveau de crue peut être estimé en considérant la géométrie de la rupture potentielle et la forme de la vallée. Les conséquences sur la zone inondée peuvent alors être évaluées.

Le barrage créé par un glissement de terrain peut se rompre rapidement par suite d'une érosion interne ou d'un déversement. La crue de rupture qui en résulte peut dépasser largement la crue naturelle et inonder de vastes zones à l'aval avec possibilité de pertes de vies humaines et de biens. En outre, d'autres ruptures de barrages situés à l'aval (effet domino) sont possibles si leur capacité d'évacuation de crue n'est pas suffisante.

Une vidange rapide de la retenue provisoire, résultant de la rupture du barrage créé par un glissement de terrain, peut déstabiliser d'autres glissements à l'amont de l'obstruction.

Les détritiques provenant de la rupture de tels barrages sont entraînés à l'aval par les débits. Ils sont susceptibles de remblayer le lit de la rivière et de barrer des affluents à l'aval, de bloquer les évacuateurs de fond de barrages et de causer des dégâts aux usines hydroélectriques.

Les conséquences à l'aval, résultant de la rupture d'un barrage créé par un glissement de terrain, peuvent être évaluées en effectuant des études classiques d'onde de rupture de barrage et d'estimation des conséquences.

7.2.2. Mesures de protection concernant des barrages créés par des glissements de terrain

Après formation d'un barrage par un glissement de terrain, des mesures de protection contre une inondation à l'amont et/ou une rupture catastrophique visent

1986). Many historical and prehistorical slides have generated stable embankments, as is shown by the diversity of lakes formed behind landslide dams (e.g. Bromhead *et al*, 1996). However, a large proportion of slide-generated dams fail within a short time, almost always due to uncontrolled overtopping or sometimes to piping (Schuster & Costa, 1986). These dams are mainly characterised by a large quantity of fine components in the slide debris.

Important examples of valley blockages formed by slope failure into existing reservoirs or affecting them include :

- The catastrophic 1963 Vaiont slide in northern Italy,
- The 1993 La Josefina slide upstream from the Paute reservoir, Ecuador (Chamot, 1994 ; D'Ercole, 1996),
- The earthquake-induced 1984 Ontake slide, Japan (Duffaut, 1987).

7.2.1. Consequences of landslide dams

Landslide dams can raise the upstream water level above the normal maximum river or reservoir level and flood upstream communities. Estimates of flood level can be made by considering the potential failure geometry in relation to the valley shape. The consequences can then be estimated from consideration of the flooded area.

The landslide dam may fail rapidly due to piping or when it is overtopped. The resulting dam-break flood may greatly exceed natural flood volumes and inundate large areas downstream with possible loss of life and economic losses. Furthermore, additional (domino effect) failures of any downstream dams are possible if sufficient flood discharge capacity is not available.

Rapid drawdown of the temporary reservoir following the failure of the landslide dam may destabilise other landslides or potential landslides upstream from the blockage.

Debris from landslide dam breaks is moved away in the form of debris flows and mudflows. This material may fill up downstream river beds and impound tributaries. The sediment may block low level outlets at dams and damage generating plant.

The downstream consequences of a landslide dam break can be evaluated using conventional dam break inundation and consequence studies.

7.2.2. Remediation of landslide dams

Following the formation of a landslide dam, remedial measures against upstream flooding and/or catastrophic failure aim at a sufficient reduction of the

à réduire suffisamment le niveau de la retenue créée. De telles mesures comprennent un pompage, des chenaux d'évacuation excavés dans le glissement et des galeries de dérivation.

On peut citer comme exemples de mesures de protection prises après des obstructions de vallées par des glissements de terrain :

- Le glissement de Vaiont où l'eau retenue à l'amont de l'obstruction de la vallée put s'écouler par une galerie de dérivation qui avait été construite à titre de précaution vis-à-vis d'une obstruction de la vallée, après des précédents problèmes survenus au cours du remplissage de la retenue (Hendron & Patton, 1986).
- Le glissement de Val Pola de 40 millions de m³, survenu en 1987 dans la vallée Valtellina (Italie), qui créa un lac sur la rivière Adda ; en vue d'éviter une rupture du barrage, un chenal de crête pour une évacuation maîtrisée fut excavé dans le barrage, une partie importante du volume de détritits fut enlevée et deux galeries de dérivation furent excavées (Bertacchi *et al*, 1988 ; Maione, 1990).
- Le glissement de terrain de Thistle, en 1983, qui coupa l'écoulement de la rivière Spanish Fork (Utah), fut géré en construisant tout d'abord un déversoir de secours, puis une galerie pour vider le lac (Bennett & Morgan, 1986).

D'autres expériences pratiques proviennent du glissement dans le Canyon Madison, en 1959, aux États-Unis (Harrison, 1974), et de la chute de roche de Randa, en 1991, en Suisse (Jaeggi *et al*, 1994).

Tous ces exemples montrent que des mesures de précaution, telles que l'excavation de chenaux d'évacuation, peuvent réduire ou même éliminer la probabilité de rupture d'un barrage créé par un glissement de terrain, et que des solutions à long terme, telles que des galeries d'évacuation de fond, peuvent être viables.

7.3. RUPTURES DE VERSANTS DE NEIGE ET DE GLACE

Les problèmes hydrauliques concernant des retenues affectées par des ruptures de versants de neige et de glace ne sont pas traités dans le présent Bulletin. Les informations suivantes sont données à titre d'introduction à ces problèmes :

Les volumes des avalanches de neige dépassent rarement 400 000 m³ et sont généralement inférieurs à 20 000 m³. Les ondes de translation engendrées par des avalanches de neige ne sont en général importantes que lorsque les retenues sont situées dans des vallées étroites et ont une faible superficie de plan d'eau.

Les problèmes de stabilité associés aux glaciers comprennent la stabilité du glacier proprement dit, le vêlage induit par la flottabilité, la stabilité des barrages de glace et les crues résultant de leur rupture.

impounded water level. Typical remedial measures include pumping, overflow channels excavated into the landslide and bypass tunnels.

Examples of remediated valley blockages caused by large landslides include :

- The Vaiont slide, where water from the reservoir upstream from the blockage was able to be passed using the bypass tunnel that had been constructed as a precaution against a valley blockage after initial problems during lake filling (e.g. Hendron & Patton, 1986)
- The 40 million m³ Val Pola landslide in the Valtellina valley (Italy) in 1987, which caused the Adda River to be impounded to form a lake and where, to avoid dam failure, a crest channel for a controlled overflow was excavated into the dam, a significant part of the debris mass was removed and two bypass tunnels were excavated (Bertacchi *et al*, 1988 ; Maione, 1990).
- The 1983 Thistle landslide, which interrupted the flow of the Spanish Fork River in Utah, was managed by initially constructing an emergency overflow spillway and then constructing a tunnel to drain the lake (Bennett & Morgan, 1986).

Further practical experiences have been described from the 1959 Madison Canyon Slide, USA, by Harrison (1974) and from the 1991 Randa rockfall in Switzerland by Jaeggi *et al* (1994).

All these examples show that precautionary measures, such as excavation of overflow channels, may reduce or even eliminate the likelihood of the landslide dam failing and that long-term solutions, such as bottom outlet drainage tunnels, may be viable.

7.3. SNOW AND ICE SLOPE FAILURES

The hydraulic problems in reservoirs affected by snow and ice slope failures are not dealt with in this Bulletin. The following information is provided as an introduction to these problems :

The volume of snow avalanches rarely exceeds 400 000 m³ and is generally not larger than 20 000 m³. Impulse waves generated by snow avalanches are usually significant only where reservoirs are in narrow valleys and have a small surface area.

The stability problems associated with glaciers include the stability of the glacier itself, buoyancy-induced calving and the stability of ice dams and their related outbreak floods.

L'ouvrage de Voight (1979) contient un certain nombre de contributions concernant les avalanches et les glaciers, en particulier celles de Peria et de Mellor relatives à la mécanique de la neige et à la dynamique des avalanches de neige respectivement, et celles de Raymond sur le mécanisme de mouvement d'un glacier.

Les effets possibles d'avalanches de neige, avec des volumes atteignant 400 000 m³, sur la retenue de Streimbach (Autriche) d'une capacité de 90 000 m³, ont été étudiés par Huber (1996) en utilisant un modèle physique.

Dans les contributions de Vischer *et al* (1991) et de Funk *et al* (1990), les problèmes de « rupture » et de « vêlage induit par la flottabilité » sont traités pour le glacier d'Unteraar et la retenue de Grimsel (Suisse) située à l'aval. Le mécanisme de rupture d'une masse de glace se détachant du corps principal de glace, sous l'effet de son poids propre, ainsi que l'effet de la pression d'eau de la retenue sur le front du vêlage, ont été étudiés. Les résultats fournis par des essais sur modèle physique et concernant les effets des ondes de translation sont également présentés.

Voight (1979) contains a number of contributions on avalanches and glaciers. These include contributions by Peria & Mellor relating to snow mechanics and the dynamics of snow avalanches respectively, and by Raymond on the mechanics of glacier movement.

The possible effects of snow avalanches with volumes of up to 400 000 m³ on a Streimbach reservoir (Austria) with 90 000 m³ storage capacity have been investigated by Huber (1996) using a physical model.

In the contributions of Vischer *et al* (1991) and Funk *et al* (1990) the problems of “breaking down” as well as “buoyancy-induced calving” is treated for Unteraar glacier and the downstream situated Grimsel reservoir (Switzerland). The mechanism of breaking down of an ice mass from the main ice body under its own weight including the effect of the water pressure in the reservoir acting on the calving front was studied. Results on the impulse wave effects obtained from physical model tests are also presented.

8. GESTION DES RISQUES

La gestion des risques est un processus d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques d'instabilité de versants, destiné à la prise de décisions circonstanciées sur l'acceptabilité, ou le traitement et la maîtrise des risques en vue de les minimiser. Les processus de gestion des risques sont de plus en plus utilisés dans les programmes modernes de sécurité des barrages.

Pour les versants de retenues, le risque est évalué dans le processus d'identification des dangers associés aux versants, d'évaluation des conséquences potentielles et de leur probabilité d'occurrence, et d'analyse des résultats au point de vue acceptabilité. Le traitement des risques est le processus de choix et de mise en œuvre de mesures destinées à gérer les risques qui ont été identifiés. Le traitement des risques peut entraîner l'acceptation et le contrôle des faibles risques, et la mise au point de plans d'atténuation pour les autres risques. L'atténuation des risques consiste à réduire leur probabilité d'occurrence, ou leurs conséquences, ou ces deux grandeurs à la fois.

Dans le présent chapitre, les principales activités de gestion des risques sont résumées, avec leur application aux risques d'instabilité de versants de retenues. L'atténuation des risques et les activités à long terme d'auscultation des versants et d'exploitation des retenues font l'objet de chapitres suivants. Pour plus de détails sur le cadre général des principes de gestion des risques, on se référera aux documents « Canadian Standard CAN/CSA-Q850-97 » et « Australia-New Zealand Standard AS/NZS4360:1999 ».

Un important principe des programmes de sécurité des barrages est le réexamen périodique des risques par une commission de contrôle indépendante. Les activités de gestion des risques, décrites ci-après, peuvent donc être accomplies au cours du développement d'un projet, de l'étude d'un versant potentiellement instable, ou comme partie intégrante des contrôles réguliers de sécurité au cours de l'exploitation de la retenue.

8.1. IDENTIFICATION DES RISQUES

Lors de l'identification des risques, toutes les zones d'instabilité potentielle de versants (dangers) et les conséquences possibles sont identifiées. L'événement ou la séquence d'événements pouvant conduire à une rupture de versant, et les conséquences résultant de cette rupture, sont également identifiés. Les études de versants fournissent les données de base pour déterminer ces zones et les caractéristiques de leur instabilité et de leur rupture possible. De même, les études d'onde de translation et d'obstruction de vallée pour ces versants aident à l'identification des conséquences possibles. L'évaluation des conséquences implique la détermination des effets du phénomène d'instabilité, soit qualitativement, soit quantitativement, en termes de pertes financières, dommages, dégradations de l'environnement, ou d'autres facteurs importants pour l'aménagement et le public.

8. RISK MANAGEMENT

Risk management is a process of identifying, analysing, and assessing slope stability risks to allow for informed decisions on accepting or treating and controlling risks in order to minimise them. Risk management processes are being increasingly utilised in modern dam safety programmes.

For reservoir slopes, risk is evaluated in the process of identifying the hazards associated with the slopes, evaluating the potential consequences and their likelihood of occurrence, and assessing the results for acceptability. Risk treatment is the process of selecting and implementing measures for managing the risks that have been identified. Risk treatment may involve accepting and monitoring low risks and developing mitigation plans for the other risks. Risk mitigation is the reduction of risks by reducing either the likelihood of an occurrence or its consequences, or both.

In this section the main risk management activities are summarised with their application to reservoir slope stability risks. Risk mitigation options and the long-term activities of slope monitoring and reservoir operations are the subject of subsequent sections. For more details on a generic framework for risk management principles, reference should be made to Canadian Standard CAN/CSA-Q850-97, and Australia-New Zealand Standard AS/NZS4360 :1999.

It is an important principle of dam safety programmes that risks are periodically reassessed by independent reviewers. Therefore the following risk management activities may be carried out during the development of a project, when assessing a potentially unstable slope, or as part of regular safety reviews during the operation of the reservoir.

8.1. RISK IDENTIFICATION

In risk identification, all the areas of potential slope instability (hazards) and the potential consequences of this are identified. The event or sequence of events that could lead to slope failure, and the sequence and consequences of events that may follow failure, are also identified. Slope assessments provide the basis for identifying these areas and the characteristics of their instability and possible failure. Similarly, impulse wave and valley blockage studies for these slopes assist in identifying the potential consequences. Consequence evaluation involves determining the outcome of the instability event, either qualitatively or quantitatively, in terms of financial losses, injury, environmental damage or any other factors of importance to the project and the public.

Il importe d'établir une liste complète de ces dangers et conséquences, de façon qu'ils soient tous soumis au processus de gestion des risques. Des méthodes mises au point lors d'ateliers peuvent être utiles à cet effet. Le chapitre 2 donne une liste de problèmes d'instabilité rencontrés. Le chapitre 3 donne des exemples d'événements à l'origine de ces problèmes et indique les conséquences possibles de l'instabilité de versants.

8.2. ANALYSE DES RISQUES

Dans l'analyse des risques, interviennent les termes de probabilité d'occurrence et de grandeur des conséquences possibles. Comme examiné au chapitre 6, l'estimation de la probabilité de rupture d'un versant et des caractéristiques de volume et de vitesse de la masse susceptible de glisser est souvent difficile et sujette à une grande incertitude.

La création d'une retenue peut augmenter ou diminuer la probabilité de rupture suivant la stabilité relative du glissement avant et après le remplissage. Des changements relativement faibles dans la stabilité peuvent fortement altérer la probabilité et les caractéristiques de rupture du versant, et il importe de détecter ou prévoir tout accroissement des vitesses de changement. Par exemple, Hendron & Patton (1986) ont indiqué que la mise en eau de la retenue avait entraîné une réduction de stabilité de l'ordre de 12 % dans le glissement de Vaiont au point de rupture. Cependant, des augmentations de vitesse avaient été détectées plus tôt pour un niveau inférieur de réduction de stabilité. L'extrême sensibilité du glissement de Jackson Creek à de faibles changements est décrite dans l'Annexe A-4.

Lors de l'évaluation de la probabilité de rupture d'un glissement de terrain ou de dégâts en résultant, une perspective régionale de la situation géologique antérieure contribue à estimer le risque dans le passé. Par exemple, Gillon & Hancox (1992) ont indiqué que les glissements dans la Gorge Cromwell (Nouvelle-Zélande) étaient d'anciens accidents qui se sont produits il y a au moins 50 000 – 150 000 ans, et que les indices géologiques laissent à penser qu'il n'y a pas eu de ruptures rapides catastrophiques au cours des 16 000 dernières années au moins.

Le comportement antérieur d'un versant doit être interprété avec soin étant donné la variété des changements (par exemple, climat, végétation, utilisation des sols et approfondissement de la vallée) ayant pu affecter la stabilité du versant dans le passé. Le comportement antérieur peut ne pas être représentatif du présent. Par exemple, Morales Arnao *et al* (1984) ont noté que des indices géologiques indiquaient une période de retour de l'ordre de 250 ans pour l'obstruction de la rivière Mantaro, au Pérou. Cependant, trois glissements de terrain catastrophiques se sont produits en moins de 60 ans et d'autres grands glissements sont potentiellement dangereux, ce qui suggère que le risque est plus grand que celui déduit d'indices géologiques uniquement, ou que les facteurs de risque ont changé.

L'utilisation d'indices géologiques pour estimer les effets probables de la montée du niveau de retenue nécessite :

- Une connaissance de cas régionaux,
- Des modèles géologiques et hydrogéologiques régionaux appropriés,

It is important to establish a comprehensive list of these hazards and consequences so that they are all subject to the risk management process. Workshop approaches may be useful for this purpose. Chapter 2 lists examples of the range of stability problems encountered. Examples of initiating events and the potential consequences of slope instability are described in Chapter 3.

8.2. RISK ANALYSIS

In risk analysis, the risks are analysed in terms of both their likelihood or probability of occurrence and the magnitude of the potential consequences. As discussed in Chapter 6, estimating the failure likelihood of a slope and the volume and velocity characteristics of the failed slide mass is often difficult and subject to considerable uncertainty.

Reservoir development can increase or decrease the likelihood of failure depending on the relative slide stability before and after lake filling. Relatively small changes in stability can significantly alter the likelihood and characteristics of slope failure, and it is important to detect or predict increasing rates of change. For example, Hendron & Patton (1986) indicated that lake filling caused a stability reduction of about 12 % at the Vaiont Slide at the point of failure. However, velocity increases had earlier been detected at a lower level of stability reduction. The extreme sensitivity of Jackson Creek slide to small changes is described in Appendix A-4.

In assessing the probability of landslide failure or damage to the project, a regional perspective of the geological precedent situation assists with establishing the background risk. For example, Gillon & Hancox (1992) indicated that the landslides in the Cromwell Gorge (New Zealand) are ancient features that developed at least 50 000-150 000 years ago, and that geological evidence suggests there have not been catastrophic rapid failures in at least the last 16 000 years.

The precedent behaviour of slopes must be interpreted with care given the variety of changes (e.g. climate, vegetation, land use and valley deepening) that may have affected slope stability in the past. Past behaviour may not be representative of the present. For example, Morales Arnao *et al* (1984) noted that geologic evidence indicates a recurrence interval of about 250 years for landslide obstruction of the Mantaro River, Peru. However, three catastrophic landslides have occurred on the Mantaro in less than 60 years and other large landslides are potentially threatening, suggesting that the risk is greater than inferred from geological evidence alone, or that risk factors have changed.

Utilising geological precedent to judge the likely effects of reservoir raising requires :

- Knowledge of regional case histories,
- Adequate regional geological and hydrogeological models,

- Une connaissance des indices géologiques antérieurs concernant des glissements de terrain dans la région,
- Une connaissance de l'histoire locale.

Le modèle de versant et les résultats de l'analyse de la stabilité relative avant et après le remplissage de la retenue, avec ou sans travaux de stabilisation, contribuent à indiquer si les probabilités de rupture peuvent diminuer, augmenter ou se maintenir avec la création d'une retenue adjacente à un glissement.

Les domaines d'incertitudes possibles qui doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de rupture comprennent :

- L'incertitude des paramètres, qui peut être largement traitée au moyen de prélèvements d'échantillons et d'essais appropriés des matériaux, d'analyses de sensibilité utilisant le modèle de versant, et d'une analyse en retour,
- L'incertitude du modèle, qui est directement liée à la qualité des reconnaissances et de leur interprétation, et qui peut conduire à des analyses sophistiquées et cependant dénuées de sens,
- L'incertitude du comportement, en particulier l'incertitude dans la prévision des changements de vitesse de mouvement du terrain résultant des effets des contraintes et de la submersion, de vidange ou d'autres variations de charge,
- L'incertitude humaine et, en particulier, l'erreur humaine résultant de fautes, d'un manque de compétences ou d'un défaut de compréhension.

L'évaluation quantitative du comportement d'un versant est difficile avant la formation d'une retenue. Il est difficile d'estimer à l'avance les changements de vitesse de mouvement susceptibles de survenir avec les divers niveaux de réduction de stabilité, ou d'estimer si les vitesses de mouvement peuvent être maintenues à des niveaux acceptables sans conduire à une rupture rapide. Cependant, les conséquences d'une rupture importante peuvent être évaluées en considérant les ondes de translation en face du glissement et en examinant si le glissement a un volume suffisant pour obstruer la retenue.

Les méthodes adoptées dans les études de sécurité des barrages peuvent être utilisées pour estimer le danger auquel est exposée la population habitant autour de la retenue ou à l'aval, sous l'effet de l'inondation et des ondes de translation.

Nonobstant les réserves susmentionnées, il est nécessaire d'établir au moins des limites pour les conséquences potentielles et leur probabilité, afin que les risques concernant les versants en question puissent être évalués et traités.

8.3. ÉVALUATION DES RISQUES

L'évaluation des risques est le processus destiné à comparer les niveaux de risque estimés avec les critères de risques acceptables, et à les classer pour établir des priorités.

- Knowledge of the geological precedent evidence for landslides in the region,
- Knowledge of local history.

The slope model and analytical results of relative stability before and after lake filling, with or without stabilisation works, assist in indicating whether failure likelihoods may decrease, increase or be maintained with formation of a reservoir adjacent to a landslide.

Areas of potential uncertainty that must be taken into account in estimating failure likelihood include :

- Parameter uncertainty, which can largely be dealt with by appropriate materials sampling and testing, by sensitivity analyses using the slope model, and by back-analysis,
- Model uncertainty, which is directly related to the quality of the investigations and their interpretation, and which can lead to sophisticated yet meaningless analyses,
- Behavioral uncertainty, in particular the uncertainty in predicting changes in landslide movement rates as a result of strain effects and inundation, drawdown or other load changes,
- Human uncertainty and, in particular, human error resulting from mistakes, lack of skills or lack of understanding.

Quantitative assessment of slope performance is difficult prior to formation of a reservoir. It is difficult to estimate beforehand what movement rate changes may occur with various levels of stability reduction, or whether movement rates can be sustained at acceptable levels without leading to a rapid failure. However, the consequences of significant failure can be assessed in terms of impact waves opposite the slide and along the reservoir, and whether the slide has sufficient volume to block the reservoir.

The methods used in dam safety studies can be used to estimate the hazard to people living around the reservoir or downstream from flooding and impulse waves.

Notwithstanding the above qualifications, it is necessary to at least establish boundaries for the potential consequences and their likelihood for the slopes under consideration so that their risks can be assessed and treated.

8.3. RISK ASSESSMENT

Risk assessment is the process of comparing the estimated levels of risk against accepted risk criteria and ranking them to establish priorities.

Quelques organismes internationaux de réglementation ont établi des critères de risques pour adoption dans les plans d'utilisation des sols et la gestion des risques industriels. Il n'y a pas de critères réglementaires de risques concernant la sécurité de la vie des populations, établis dans le cas des grands barrages à travers le monde, pour adoption dans les études de quantification des risques. Il importe de savoir que les risques tolérables varient d'un pays à l'autre. Il revient à chaque pays et à chaque autorité de contrôle de la sécurité des barrages de définir les politiques de risques appropriées à leurs situations particulières.

Cependant, un certain nombre d'autorités de contrôle de barrages considèrent maintenant la valeur des études basées sur le risque et, sans aucun doute, examineront les critères de risques individuels et sociétaux utilisés par d'autres entreprises industrielles, ces critères étant généralement établis en se basant sur le principe ALARP (Health and Safety Executive, 1998 et 1999 ; ANCOLD, 1994 et 1996).

Les risques sociétaux peuvent être représentés sous la forme de courbes FN, où F est la fréquence annuelle de danger causant N morts ou plus (voir Fig. 11). Sur de tels graphiques, il y a une zone de risque inacceptable, i.e. où le risque ne peut être en aucune façon justifié. À l'autre extrémité de l'échelle, il y a une zone de risque largement acceptable, que la majorité de la communauté acceptera. Entre ces deux zones, existe une zone (la zone ALARP « as low as reasonably practicable »/« aussi faible que raisonnablement possible »), où les risques ne sont pas nécessairement acceptés mais sont tolérés, du fait qu'il n'est pas réaliste ni possible d'éliminer complètement le risque.

Si des estimations qualitatives de probabilité de rupture ont été adoptées, elles peuvent être classées sous la forme d'une matrice telle que celle représentée sur la Fig. 12. Des estimations des limites supérieure et inférieure seront incluses dans les classements pour tenir compte des incertitudes. Ce type de matrice est utilisable pour classer tous les événements potentiels.

Les conséquences ont été couramment évaluées en termes d'effets sur la sécurité de la vie des populations, d'effets environnementaux, financiers et sociaux.

Des systèmes simples peuvent également être établis pour des classements par ordre d'importance. Par exemple, les glissements de terrain de la Gorge Cromwell furent classés en deux catégories. Les glissements potentiellement catastrophiques étaient ceux présentant de graves conséquences, principalement en raison de leurs volumes importants et de leurs emplacements critiques, et de leur possibilité de provoquer des ondes déversantes dangereuses sur le barrage ou une obstruction de la retenue. Les glissements non catastrophiques étaient ceux présentant des conséquences mineures du fait de leurs faibles volumes ou de leurs emplacements moins critiques.

Les décisions concernant les investigations et l'atténuation des risques étaient basées sur cette classification. Pour les glissements potentiellement catastrophiques, des travaux de stabilisation étaient nécessaires pour contrecarrer les effets du remplissage de la retenue et maintenir les risques à des niveaux bas acceptables. Aucuns travaux importants de traitement n'étaient entrepris pour les glissements non catastrophiques.

Some international regulatory agencies have established risk criteria for use in land planning and managing industrial risks. There are no regulatory life safety risk criteria established for large dams worldwide for use with quantified risk analyses. It is important to recognise that tolerable risks vary between countries. It is for each country and dam safety jurisdiction to determine the risk policies appropriate to their circumstances.

However a number of dam regulators are now considering the value of risk based assessments and will no doubt consider individual and societal risk criteria used by other industrial making process, generally set within the ALARP principle (Health and Safety Executive, 1998 and 1999, ANCOLD, 1994 and 1996).

Societal risks may be expressed as FN curves where F is the annual frequency of the hazard causing N or more fatalities (e.g. see Fig. 11). On such curves there is an area of unacceptable risk, *i.e.* risk that cannot be justified by any means. At the other end of the scale there is a region of broadly acceptable risk, which the majority of the community will accept. Between these two regions there is an area (the “as low as reasonably practicable” or ALARP area) where risks are not necessarily accepted but are tolerated because it is unrealistic and impractical to completely eliminate the risk.

If qualitative estimates of failure likelihood have been used, they can be ranked and assessed using a matrix such as shown in Fig. 12. Upper and lower bound estimates should also be included in the rankings to account for uncertainty. This type of matrix may be used to rank all potential events.

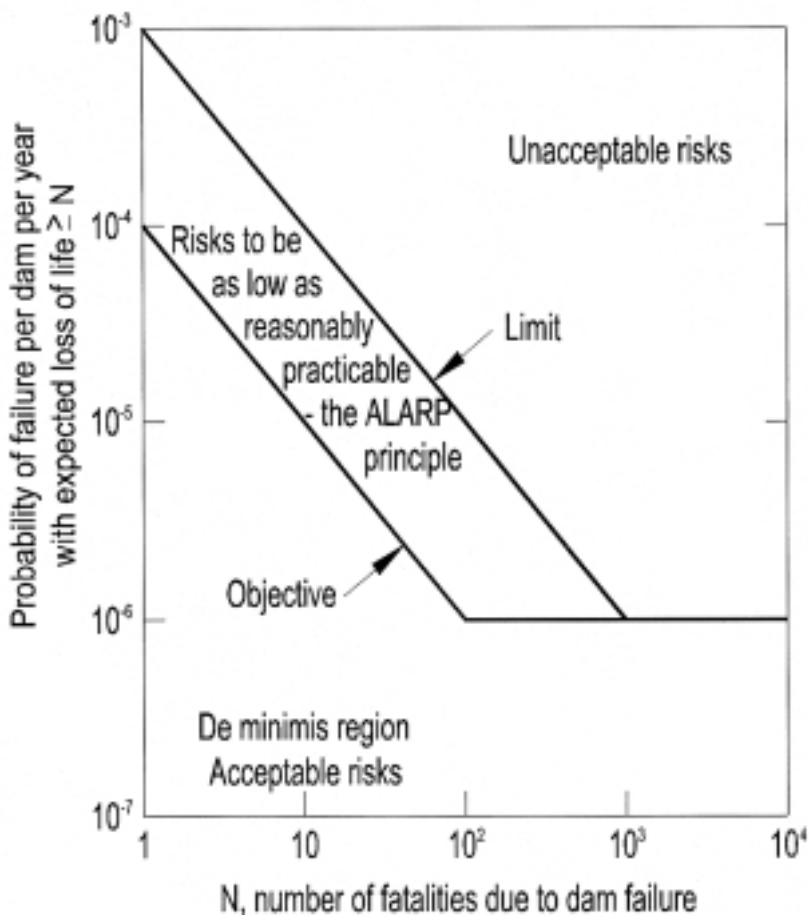
Consequences have been commonly evaluated in terms of life safety, environmental, financial and social effects.

Simple ranking systems can also be developed for prioritisation purposes. For example, the Cromwell Gorge landslides were separated into two categories. Potentially catastrophic slides were those assessed as presenting a severe consequence, mainly because of their large volume and critical location, and their potential to cause severe overtopping waves at the dam or a reservoir blockage. Non-catastrophic slides were those with low consequence potential because of their small volumes or less critical locations.

The decision on investigation and mitigation of risk was based on this classification. For the potentially catastrophic slides, stabilisation works were required to offset the effects of lake filling and to maintain risks at acceptably low levels. No major remedial works were undertaken for the non-catastrophic slides.

Un autre exemple provient du « Japanese Institute of Construction Engineering » (1995) qui a établi des tableaux simples pour le classement des reconnaissances et études par ordre de priorité. Ces tableaux sont reproduits dans l'Annexe D. En appliquant les résultats d'une évaluation préliminaire des risques, un classement par ordre de priorité est obtenu. À partir de là, le champ des reconnaissances et études du glissement est déterminé.

Ces processus d'évaluation et de classement des risques, même si seuls des résultats qualitatifs sont possibles, permettent de prendre des décisions bien fondées pour le classement et l'acceptabilité des risques, ou pour le traitement et le contrôle des risques afin de les réduire. Les comptes rendus de l'Atelier International sur l'Évaluation des Risques de Glissements de Terrain (Cruden & Fell, 1997) contiennent un certain nombre d'exemples et de références concernant des glissements de versants de retenues.



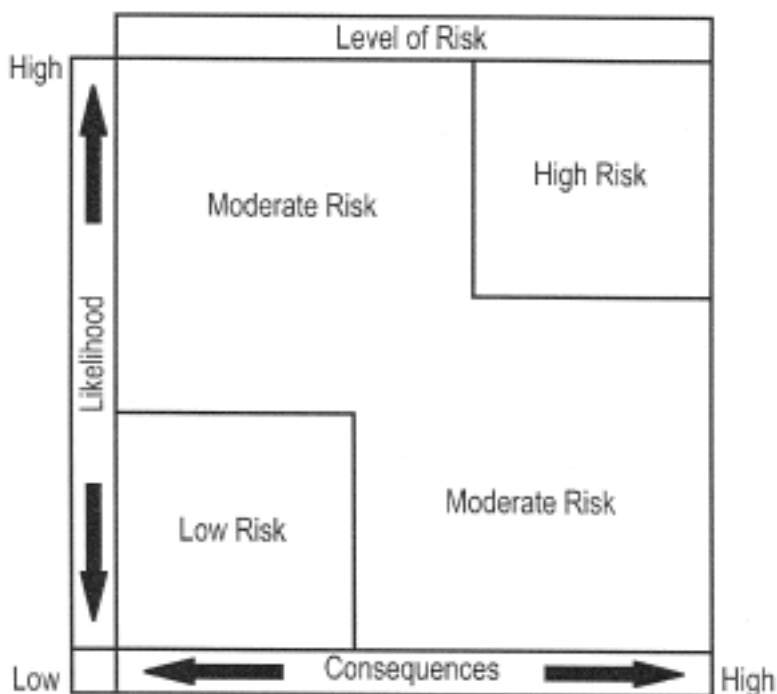
In another example, the Japanese Institute of Construction Engineering (1995) has produced some simple charts for prioritising investigations. These are reproduced in Appendix D. By applying the results of a preliminary risk assessment, a priority rating is obtained. From this, the scope of landslide investigations is determined.

These processes of assessing and ranking the risks, even if only qualitative outcomes are possible, allows for informed decisions on prioritisation and on accepting risk, or treating and controlling risks so that they are minimised. The Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, (Cruden & Fell, 1997) contains a number of case histories and references which consider reservoir landslides.

Fig. 11

Proposed ANCOLD amended interim societal criteria (ANCOLD, 1996)
Critères de risques sociétaux modifiés, proposés par l'ANCOLD (ANCOLD, 1996)

Probability of failure per dam per year with expected loss of life $\geq N$	<i>Probabilité de rupture/barrage/an, avec perte prévue de vies humaines $\geq N$</i>
N, number of fatalities due to dam failure	<i>N, nombre de morts dues à la rupture du barrage</i>
Unacceptable risks	<i>Risques inacceptables</i>
Risks to be as low as reasonably practicable – the ALARP principle	<i>Risques aussi faibles que raisonnablement possible – le principe ALARP</i>
Limit	<i>Limite</i>
Objective	<i>Objectif</i>
De minimis region	<i>Zone de faibles valeurs</i>
Acceptable risks	<i>Risques acceptables</i>



8.4. TRAITEMENT DES RISQUES

Le traitement des risques est le processus destiné à choisir et à mettre en œuvre des mesures pour la gestion des risques qui ont été identifiés. Des risques d'instabilité de versant, de faible niveau ou acceptables, peuvent ne nécessiter qu'une auscultation et un examen périodique. D'autres risques nécessiteront l'identification et l'évaluation des solutions de traitement, et la mise en œuvre de mesures d'atténuation. Des mesures d'auscultation et des examens périodiques seront nécessaires pour contrôler le risque résiduel, largement réduit, qui subsistera après le traitement.

Un certain nombre de mesures de traitement ou d'atténuation, qui ont été adoptées dans le traitement des problèmes d'instabilité de versants de retenues, sont décrites dans le chapitre 9. L'utilisation du modèle analytique de versant, pour évaluer l'effet des mesures de stabilisation sur la stabilité relative du versant, a été traitée dans le chapitre 6.

Une évaluation quantitative des risques peut être utilisée pour comparer l'efficacité relative des diverses solutions de traitement. Cela nécessite une estimation de la probabilité de rupture et des conséquences, pour chaque solution de traitement, au moyen du processus d'évaluation des risques, ainsi qu'une comparaison au point de vue acceptabilité des risques et coût du traitement.

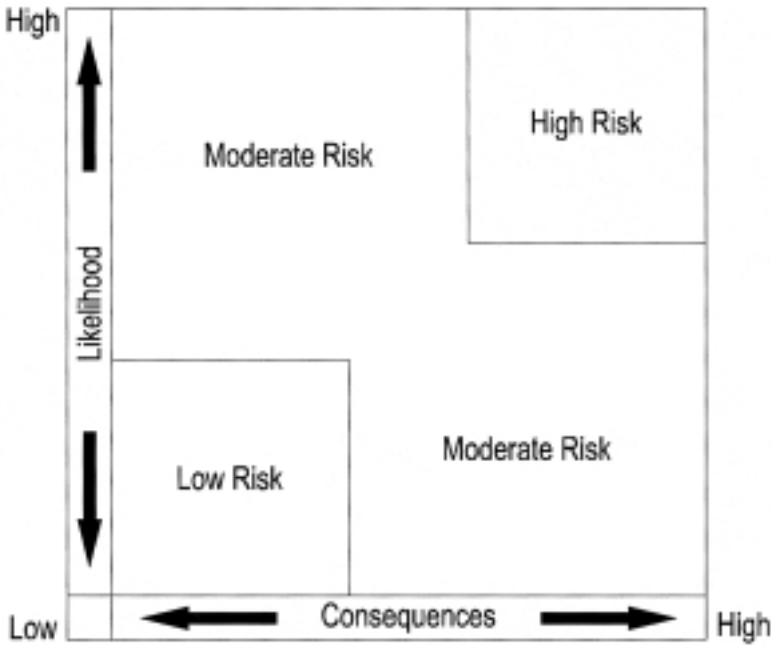


Fig. 12

**8 . 4 .
R I S K**

TREATMENT

Risk treatment is the process of selecting and implementing measures for managing the risks that have been identified. Low priority or acceptable slope instability risks may require no further consideration other than monitoring and periodic review. Other risks will require the identification and evaluation of treatment options and the implementation of mitigation measures. Monitoring and periodic review will be necessary to manage the greatly reduced residual risk that will remain after treatment.

A number of treatment or mitigation measures that have been used in treating reservoir slope stability problems are described in Chapter 9. The use of the analytical slope model to evaluate the effect of stabilisation measures on the relative stability of the slope has been referred to in Chapter 6.

Quantitative risk assessment can be used to compare the relative effectiveness of various treatment options. It requires estimates of the likelihood of failure and the consequences for each of the treatment options to be processed through the risk assessment process and their risk acceptability and cost effectiveness to be compared.

9. ATTÉNUATION DES RISQUES

Une atténuation des risques peut être obtenue par des mesures techniques ou opérationnelles qui réduisent la probabilité de rupture et/ou les conséquences.

L'atténuation et la gestion des risques de glissement de versants de retenues font appel aux mêmes techniques que celles utilisées pour d'autres glissements de terrain, de même qu'à des techniques qui sont disponibles pour les problèmes particuliers en question. Très souvent, des combinaisons de diverses mesures d'atténuation et de gestion des risques ont été utilisées. Dans le cadre des présentes recommandations, on porte un surcroît d'attention sur les techniques spéciales disponibles pour les retenues.

Au cours de la phase de projet, le risque peut être atténué en tenant compte des problèmes de stabilité de versant de retenue dans le choix de l'emplacement, du type, des dispositions générales de l'aménagement, du niveau de retenue et du mode d'exploitation de l'aménagement.

À toute époque, les versants peuvent être stabilisés, les ouvrages modifiés, l'exploitation de la retenue modifiée, ou l'utilisation de la retenue et des sols limitée. En outre, les risques peuvent être réduits par des mesures d'auscultation et l'établissement de plans d'alerte et de secours.

Après la mise en eau de la retenue, les moyens-clés pour confirmer que le risque reste à un niveau acceptable sont les résultats d'auscultation et les observations, analysés avec l'aide du modèle de versant.

9.1. PROJET DE LA RETENUE ET DU BARRAGE

Une souplesse et une opportunité très grandes pour traiter ou éviter les problèmes d'instabilité de versant de retenue se présentent au cours de la conception et de l'avant-projet sommaire de la retenue et du barrage. Bien qu'un grand nombre des mêmes options restent disponibles à une phase ultérieure, elles conduisent souvent à une augmentation de coût et de temps.

Avant le choix définitif de l'axe du barrage, les projeteurs ont la possibilité, soit d'éviter complètement les problèmes en choisissant d'autres emplacements, soit d'atténuer les problèmes d'ondes induites par le glissement en situant l'axe du barrage à l'aval d'élargissements ou de courbes prononcées dans la retenue, qui peuvent dissiper l'énergie des ondes. Au barrage Mica, il a été constaté que toutes ondes prenant naissance à l'amont d'un important élargissement de la retenue n'avaient pas d'impact sur le barrage, de sorte que des glissements susceptibles de se produire à l'amont de cet élargissement causaient beaucoup moins de préoccupations vis-à-vis du barrage (Mylrea *et al*, 1978).

Le choix du niveau de retenue peut aussi avoir une grande influence sur la stabilité d'un versant. On peut choisir un niveau qui évite la submersion du pied d'un versant sensible, ou un niveau qui submergera totalement un tel versant. Chaque cas doit être spécifiquement examiné en se servant du modèle de versant et

9. RISK MITIGATION

Risk mitigation may be achieved by engineering or operational solutions that reduce the probability of failure and/or reduce the consequences.

Mitigation and management of reservoir landslide risk uses the same techniques that are used for other landslides, as well as techniques that are available as a result of the nature of the development. In many cases, combinations of the various risk management and mitigation measures have been used. For the purpose of this guideline, additional emphasis has been placed on the special techniques available for reservoirs.

During the design stage, risk can be mitigated by accounting for reservoir slope stability in the selection of the location, type, general arrangement, reservoir level and operation of the development.

At any stage in the development, slopes can be stabilised, structures can be modified, reservoir operation can be modified, or reservoir and land use can be restricted. In addition, risk can be mitigated by monitoring and emergency preparations.

After the formation of the reservoir, the key tools for confirming that on-going risk remains at an acceptable level are monitoring data and observations, reviewed with the slope model.

9.1. RESERVOIR AND DAM DESIGN

The greatest flexibility and opportunity to remedy or avoid reservoir slope stability problems are available during planning and preliminary design of the reservoir and dam. Although many of the same options remain available at a later stage, they often incur added cost and time.

Prior to final selection of the dam axis, designers have the flexibility either to avoid problems completely by selecting alternative locations or to mitigate slide-generated wave problems by locating the axis downstream from widenings or sharp corners in the reservoir that could dissipate wave energy. At Mica Dam it was found that any waves generated upstream from a large widening of the reservoir had no impact on the dam itself, thus potential slides upstream from this widening were of much less future concern to the dam (Mylrea *et al*, 1978).

The selection of reservoir level can also have a major influence on slope stability. It may be possible to select a level that avoids flooding the toe of a susceptible slope, or one that will completely inundate such a slope. Each case must be specifically assessed on the basis of the slope model and all possible de-stabilising

en tenant compte de tous les facteurs de déstabilisation possible, du fait que la submersion peut ne pas être le seul facteur de déclenchement. Au cours des études du projet Revelstoke, un barrage unique avec une retenue submergeant le pied du glissement Downie fut comparé à deux barrages de moindre hauteur qui évitaient la submersion du pied du glissement. Il fut déterminé que le barrage unique de grande hauteur était plus avantageux, même avec un budget prévu pour des travaux éventuels de stabilisation du glissement.

Des modifications sont souvent apportées au projet des ouvrages pour contrecarrer les effets des problèmes d'instabilité de versant de retenue. Ces modifications peuvent être réalisées au cours de la phase d'études préliminaires, mais le plus souvent elles interviennent plus tard à la suite de découverte ou de changement dans l'appréciation d'un problème.

Un choix adéquat de type de barrage et de dispositions constructives peuvent également conduire à une atténuation des dégâts susceptibles de résulter du déferlement d'ondes et du déversement d'ondes sur le barrage. Les barrages en béton sont beaucoup moins sujets à des dégâts lors de déversement d'ondes générées par un glissement. La revanche peut être augmentée et les tracés peuvent être adaptés en vue d'éviter une amplification des ondes sur tous les types de barrage. Au barrage Revelstoke, non seulement le barrage en terre a une revanche plus grande que le barrage en béton, mais également la revanche est plus importante près de l'extrémité rive droite du barrage où les études d'ondes sur modèle indiquèrent que celles-ci s'amplifiaient.

En Chine, le barrage Longyanglia sur le Fleuve Jaune a une revanche de 10 m au-dessus du niveau maximal de retenue pour réduire les dégâts éventuels résultant d'ondes de translation provoquées par des glissements de terrain dans la retenue (Comité Chinois des Grands Barrages, 1987 ; Miguez de Mello, 1996).

Au barrage Mica, au Canada, l'épaisseur de la crête du barrage fut augmentée au cours de la construction en raidissant les talus, et la proportion de moraine glaciaire, de bonne résistance à l'érosion, rentrant dans la constitution du noyau, fut augmentée pour résister à l'érosion résultant d'un déversement d'ondes produites par des glissements de terrain (Mylrea *et al*, 1978). Au barrage Cheakamus, également au Canada, le profil en terre fut muni d'une crête en béton afin d'augmenter la résistance à l'érosion, et le mur d'aile en béton fut conforté par un remblai en enrochement à l'aval pour prévenir un renversement sous l'action d'ondes de translation.

L'ancrage des ouvrages et l'augmentation de la revanche au moyen de parapets ou d'une surélévation de la crête ont été également utilisés pour limiter les dégâts susceptibles d'être causés au barrage par des ondes de translation.

Les usines hydroélectriques peuvent être éloignées du barrage, ou situées en souterrain avec isolation par batardeau, afin de les rendre moins sensibles aux dégâts causés par des ondes déversantes.

Si un remplissage de la retenue par étapes est adopté comme mesure de gestion des risques, les ouvrages d'évacuation doivent être conçus à cet effet. Ces ouvrages peuvent également être conçus pour permettre une exploitation de la retenue au-dessous du niveau normal de retenue, en vue d'augmenter la revanche au cours de la période initiale d'exploitation ou lors de périodes à risque élevé.

factors, because inundation may not be the only triggering factor. During design of the Revelstoke Project a single high dam which flooded the toe of Downie Slide was compared to two lower dams that avoided inundation of the slide toe. It was determined that the high dam was more desirable even when funds were budgeted for stabilisation of the slide if it became necessary.

Modifications to project structures are widely used to offset the effects of reservoir stability problems. These modifications could be included during the early design stage, but more often they are incorporated later as a result of the discovery or change in appreciation of a problem.

Damage from wave runup and overtopping waves can also be mitigated during the selection of dam type and project arrangement. Concrete dams are very much less susceptible to damage during overtopping by slide generated waves. Freeboard can be increased and alignments can be adjusted to avoid wave build up on all dam types. At Revelstoke Dam, not only does the earthfill section of the dam have greater freeboard than the concrete dam, but the freeboard is greatest near the right end of the dam where wave model studies indicated waves would build up.

In China, the Longyanglia Dam on the Yellow River has 10 m of freeboard above maximum normal water levels to minimise potential impulse wave damage from reservoir landslides (Chinese National Committee on Large Dams, 1987; Miguez de Mello, F., 1996).

At Mica Dam, in Canada, the width of the dam crest was increased during construction by steepening the dam slopes, and the proportion of erosion resistant glacial till forming the dam core was increased to resist erosion by any overtopping waves generated by slides (Mylrea *et al*, 1978). At Cheakamus Dam, also in Canada, the earthfill section was provided with a concrete cap to increase its erosion resistance and the concrete wingwall was supported by a downstream rockfill to prevent overturning during a slide-generated wave.

Anchoring of structures and increasing freeboard by means of parapet walls or crest-raising have also been used to limit slide-generated wave damage to dams.

Powerhouses may be located remotely, or underground and bulkheaded, to make them less susceptible to damage from overtopping waves.

In the event that a staged lake filling is utilised as a risk management measure, then the outlet structures will need to be arranged for this purpose. The outlet structures may also be designed to allow reservoir operation below the full supply level, either to increase freeboard in the initial period of reservoir operation, or to allow for increased freeboard in periods of high risk.

9.2. MÉTHODE DES OBSERVATIONS

Il n'est pas possible de fournir une garantie absolue de stabilité pour tous les versants situés autour d'une retenue. Une incertitude subsiste inévitablement, malgré le niveau des reconnaissances, de l'analyse et des travaux correctifs entrepris. Riemer (1992) a noté que les glissements de versant de retenue étaient même plus difficiles à évaluer que ceux relatifs à d'autres versants du fait que :

- Les effets de la retenue sur les versants et les glissements existants créent une situation nouvelle, sans précédent,
- Le risque est fortement augmenté par la présence de la retenue et des ouvrages qui la créent,
- La structure géologique du bassin de retenue peut présenter un grand danger, par exemple du fait de la présence de versants raides avec une instabilité évidente dans une zone d'activité sismique.

Étant donné ces conditions, l'incertitude qui subsiste peut être gérée avec réalisme, en utilisant la méthode des observations (Peck, 1969), avec des inspections approfondies, faites au bon moment, et des décisions pour ajuster les solutions techniques.

La méthode des observations est basée sur le concept, soutenu par des exemples, que la plupart des glissements de terrain (autres que ceux provoqués par des événements exceptionnels tels que les ruptures déclenchées par des séismes, ou des matériaux fragiles tels que des argiles) ne se produisent pas sans signe précurseur (Riemer, 1992). La méthode comprend trois éléments :

- Un dispositif d'auscultation capable de détecter, de façon fiable, précise et rapide, des signes avertisseurs,
- Une stratégie d'actions à mettre en œuvre dans le cas de mouvements de versant inacceptables,
- Une méthode organisationnelle efficace qui réduit les données d'entrée, évalue les observations, et détermine les mesures à prendre et à quel moment.

Dans la méthode des observations, Eurocode 7 (1997) demande de satisfaire aux quatre prescriptions suivantes :

1. Les limites du comportement acceptable seront établies.
2. Le domaine du comportement possible sera évalué et on démontrera qu'il y a une probabilité acceptable que le comportement réel soit à l'intérieur des limites acceptables.
3. Un programme d'auscultation sera établi et déterminera si le comportement réel se situe dans des limites acceptables. L'auscultation l'indiquera de manière claire, suffisamment tôt, et à des intervalles suffisamment courts pour permettre d'entreprendre, avec succès, des actions d'urgence. Les temps de réponse des appareils de mesure et les procédures d'analyse des résultats seront suffisamment rapides comparativement à l'évolution du système.
4. Un plan d'actions d'urgence sera établi. Il peut être mis en œuvre si l'auscultation révèle un comportement sortant des limites acceptables.

9.2. THE OBSERVATIONAL METHOD

It is not possible to provide an absolute guarantee of the stability of all slopes around a reservoir. Uncertainty inevitably remains, regardless of the degree of investigation, analysis and remedial works undertaken. Riemer (1992) noted that reservoir landslides are even more difficult to assess than other slopes because :

- The impacts of the reservoir on the slopes and existing slides create a new, unprecedented situation,
- The risk is greatly increased by the presence of the reservoir and the structures that create it,
- The geological setting of the reservoir may imply an extreme hazard, such as very steep slopes with obvious instability in an area of active seismicity.

Given these conditions, the uncertainty that remains may be realistically managed by using the observational approach (Peck, 1969), utilising sound, timely observations and decisions to adjust the technical solutions.

The observational approach is based on the concept, supported by case histories, that most landslide events (other than those caused by extreme events such as earthquake-induced failures or brittle materials like quick clays) do not occur without warning (Riemer, 1992). The method comprises three elements :

- A monitoring system that is capable of detecting warning signs reliably, accurately and promptly,
- A strategy of actions to be taken in the event of unacceptable slope movements,
- An efficient organisational approach that reduces incoming data, evaluates the observations and decides which action to take, and when.

In adopting the observational method, Eurocode 7 (1997) requires that the following four requirements be met :

1. The limits of acceptable behaviour shall be established.
2. The range of possible behaviour shall be assessed and it shall be shown that there is an acceptable probability that the actual behaviour will be within acceptable limits.
3. A plan of monitoring shall be devised which will reveal whether the actual behaviour lies within acceptable limits. The monitoring shall make this clear at a sufficiently early stage, and with sufficiently short intervals to allow contingency actions to be undertaken successfully. The response times of the instruments and the procedures for analysing the results shall be sufficiently rapid in relation to the evolution of the system.
4. A plan of contingency actions shall be devised. It may have to be adopted if the monitoring reveals behaviour outside acceptable limits.

Des dispositifs d'auscultation supplémentaires ou de remplacement sont parfois nécessaires au cours des diverses phases du projet. Les résultats seront analysés à diverses étapes et toutes mesures d'urgence seront mises en place si nécessaire.

Ils faut se rappeler que la plupart des glissements se produisent au cours de la mise en eau de retenues ou des premières années de leur exploitation, en particulier lors de vidanges rapides. Il y a beaucoup d'exemples de mise en eau de retenues ayant conduit à une réactivation de glissements préhistoriques et/ou à des changements de vitesse de déplacement pour des glissements en activité, même lorsque ceux-ci avaient fait l'objet de mesures correctives. Il y a également de nombreux exemples de glissements de versants de retenues n'ayant pas fait l'objet de mesures correctives, et n'ayant pas subi de conséquences fâcheuses.

Le contrôle de routine des versants de retenues, qu'ils soient stabilisés ou non, par inspection visuelle ou auscultation, est une pratique reconnue (voir chapitre 10).

Gavard *et al* (1997) ont présenté l'exemple de la retenue Karakaya sur l'Euphrate, dans le sud-est de la Turquie, où il fut décidé que de coûteux travaux de correction ne seraient pas exécutés sur de grands glissements situés le long de la retenue. À la place, un programme d'inspection visuelle et d'auscultation fut préparé et mis en œuvre. En outre, des plans d'alerte furent établis eu égard aux habitations situées à proximité du barrage et à l'aval, une évacuation immédiate étant assurée en cas de catastrophe. Les plans prévoyaient également d'alerter l'exploitant de l'usine hydroélectrique de toutes situations critiques pouvant nécessiter une vidange de la retenue. Aucuns travaux correctifs importants, aucune restriction dans l'exploitation de la retenue, ni aucun relogement de population, n'ont été nécessaires à ce jour.

Otto & Hauenstein (1997) ont présenté une évaluation des risques concernant la chute possible d'une masse rocheuse en mouvement sur une rive de la retenue de Klontal en Suisse. Une étude des ondes de translation a été effectuée et le glissement est ausculté. L'exécution de mesures correctives a été jugée impossible et il a été décidé qu'en cas d'accélération du glissement le niveau de la retenue serait abaissé et une route fermée.

9.3. MÉTHODES DE STABILISATION

Un grand nombre des programmes étendus et coûteux de stabilisation de glissements de terrain, tels que ceux exécutés le long de la rivière Columbia (Canada), au barrage Tablachaca sur la rivière Mantaro (Pérou) et dans la Gorge Cromwell (Nouvelle-Zélande) – voir Annexe A –, ont été mis en œuvre pour la protection des aménagements de retenue.

La stabilisation d'un glissement de terrain nécessite une réduction des forces motrices et/ou une augmentation des forces résistantes. Dans quelques cas importants de glissement de versant de retenue, l'évaluation géologique a démontré une probabilité extrêmement faible de rupture. Dans de tels cas, seule une faible augmentation de stabilité ou même juste un maintien de l'équilibre des forces existant avant création de la retenue a été jugée acceptable (Hoek, 1991). Pour de

Additional or replacement monitoring may be necessary during various project phases. The results should be assessed at various stages and any planned contingency action put in place if necessary.

It should be remembered that most slide events occur during lake filling or in the first few years of operation, particularly in the event of significant rapid drawdowns. Many case histories provide examples of lake filling leading to re-activation of pre-historic slides and/or changed creep rates for active slides, even where these have been subject to remedial measures. Equally, there are many examples where reservoir landslides have not been subjected to remedial measures, and have not suffered adverse consequences.

It is recognised practice (see Chapter 10) to routinely assess reservoir landslides, whether stabilised or not, by visual inspection or monitoring.

Gavard *et al* (1997) presented the experience of the Karakaya reservoir on the Euphrates River in SE Turkey, where it was decided that expensive remedial works would not be implemented on the many large landslides along the reservoir. Instead, a visual inspection and monitoring plan was developed and adopted. In addition, emergency plans were drafted for settlements in the vicinity of the reservoir as well as downstream of the dam, including immediate evacuation in a worst case scenario. Emergency plans also covered alerting the powerplant operator of critical situations that might require drawdown of the reservoir. No large remedial works or restrictions on reservoir operation, nor resettlement of people, have yet been required.

Otto & Hauenstein (1997) presented an assessment of risks concerning the potential fall of a sliding rock mass at Lake Klontal in Switzerland. An assessment of potential impulse waves has been made and the slide is monitored. Remedial measures are considered not possible and it is acknowledged that in the case of an acceleration of the slide, the water level of the lake will have to be lowered and a road closed.

9.3. STABILISATION METHODS

Many of the most extensive and expensive landslide stabilisation programs, such as those carried out along the Columbia River in Canada, at Tablachaca Dam on the Mantaro River in Peru and the Cromwell Gorge in New Zealand (see Appendix A), have been for the protection of reservoir projects.

Stabilisation of an existing or pending landslide requires a reduction in the driving forces and/or an increase in the available resisting forces. In some important reservoir landslide cases, geological evaluation has demonstrated an extremely low probability of failure. In such cases, only a small increase in stability or even just maintenance of the pre-reservoir balance of forces has been judged acceptable (Hoek, 1991). For such slopes, the calculated nominal factors of safety can remain

tels versants, les coefficients de sécurité nominaux calculés peuvent rester bien au-dessous de ceux considérés comme nécessaires dans les études classiques de mécanique des sols ou de mécanique des roches concernant des versants.

Tableau 3

Liste de mesures de stabilisation de glissements de terrain
(d'après Popescu, 1996, avec modifications pour les grands glissements de terrain)

1.	MODIFICATION DE GÉOMÉTRIE DU VERSANT
1.1	Enlèvement de matériaux de la zone entraînant le glissement (avec remplacement éventuel par du remblai léger)
1.2	Addition de matériaux à la zone maintenant la stabilité (risberme ou remblai de butée)
1.3	Réduction de l'angle du versant
1.4	Rupture contrôlée
2.	DRAINAGE ET PROTECTION CONTRE LES INFILTRATIONS
2.1	Drainage en surface pour empêcher l'écoulement d'eau vers la zone de glissement (fossés et tuyaux de collecte)
2.2	Étanchéité de surface
2.3	Recharges de butée constituées de matériaux à grains grossiers (effet hydrologique)
2.4	Forages verticaux (petit diamètre) avec pompage ou autodrainage
2.5	Puits verticaux (grand diamètre) avec drainage par gravité
2.6	Forages subhorizontaux ou subverticaux
2.7	Galeries, puits de drainage
2.8	Plantation de végétation (effet hydrologique)
3.	OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT
3.1	Murs-poids de soutènement
3.2	Murs constitués de billes de bois et de remblai
3.3	Murs en gabions
3.4	Piles, pieux et caissons
3.5	Murs en béton armé coulé in situ
3.6	Ouvrages de soutènement en terre armée avec armatures métalliques/en polymère/géotextile, sous forme de bandes/feuilles
3.7	Recharges de butée constituées de matériaux à grains grossiers (effet mécanique)
3.8	Filets de rétention pour les parois de versants rocheux
3.9	Systèmes destinés à atténuer ou à arrêter les chutes de roche (fossés, banquettes, barrières et murs)
3.10	Blocs de protection en roche/béton contre l'érosion
4.	RENFORCEMENT INTERNE DU VERSANT
4.1	Tirants (précontraints ou passifs)
4.2	Injection
4.3	Clavettes de cisaillement à travers les plans de rupture
4.4	Fixation du sol

well below those considered necessary in traditional soil or rock mechanics slope design projects.

Table 3
A Brief List of Landslide Stabilisation Measures.
(adapted from Popescu, 1996, and modified for large landslides)

1.	MODIFICATION OF SLOPE GEOMETRY
1.1	Removing material from the area driving the landslide (with possible substitution by lightweight fill)
1.2	Adding material to the area maintaining stability (counterweight berm or fill)
1.3	Reducing general slope angle
1.4	Controlled failure
2.	DRAINAGE AND INFILTRATION PROTECTION
2.1	Surface drains to divert water from flowing onto the slide area (collecting ditches and pipes)
2.2	Surface sealing
2.3	Buttress counterforts of coarse-grained materials (hydrological effect)
2.4	Vertical (small diameter) boreholes with pumping or self draining
2.5	Vertical (large diameter) wells with gravity draining
2.6	Subhorizontal or subvertical boreholes
2.7	Drainage tunnels, shafts, galleries or adits
2.8	Vegetation planting (hydrological effect)
3.	RETAINING STRUCTURES
3.1	Gravity retaining walls
3.2	Crib-block walls
3.3	Gabion walls
3.4	Passive piles, piers and caissons
3.5	Cast-in situ reinforced concrete walls
3.6	Reinforced earth retaining structures with strip/sheet - polymer/metallic/textile reinforcement elements
3.7	Buttress counterforts of coarse-grained material (mechanical effect)
3.8	Retention nets for rock slope faces
3.9	Rockfall attenuation or stopping systems (rocktrap ditches, benches, fences and walls)
3.10	Protective rock/concrete blocks against erosion
4.	INTERNAL SLOPE REINFORCEMENT
4.1	Anchors (prestressed or passive)
4.2	Grouting
4.3	Friction keys across failure planes
4.4	Soil nailing

Des revues générales de méthodes de stabilisation de versants ont été présentées par Hutchinson (1977), Zaruba & Mencl (1982), Bromhead (1992), Riemer (1992), Schuster (1992), Fell (1994), Holtz & Schuster (1996), entre autres. Les sous-chapitres suivants indiquent les mesures qui ont été adoptées sur des retenues et les aspects particuliers dont il faut tenir compte.

Pour plus de commodité, les méthodes disponibles sont examinées séparément suivant les catégories figurant dans le Tableau 3. Toutefois, dans de nombreux cas, des combinaisons de mesures de stabilisation sont adoptées en vue d'optimiser la solution technique. Un exemple est le barrage Chicoasen, au Mexique (Espinosa & Bernal, 1982), où l'emplacement des ouvrages fut modifié, les versants drainés, consolidés par boulonnage et excavés, et le sautage contrôlé.

Pour de grands glissements de terrain, les solutions de stabilisation les moins coûteuses sont le drainage et la protection contre les infiltrations. Il est nécessaire de considérer non seulement l'ensemble du versant, mais aussi les lobes individuels de glissement. Cette approche vise à obtenir le traitement le plus bénéfique. Souvent, une amélioration importante de stabilité peut être obtenue en traitant seulement une partie relativement petite du versant.

9.3.1. Modification de géométrie du versant

Une modification de géométrie du versant, soit par mise en place de risbermes de stabilisation (butées), soit par excavation de tout ou partie du versant, est une méthode efficace de stabilisation de versant pour les glissements de petites et moyennes dimensions. L'application de cette méthode de stabilisation est souvent particulièrement avantageuse au cours de la construction du barrage, en raison de la disponibilité de matériel de construction, de matériaux en excès provenant des fouilles, ou d'un besoin de matériaux de remblai pour le barrage.

Le concept « ligne d'influence » peut être utilisé pour une évaluation rapide des effets d'une modification du versant proposée. À condition que l'on ait une bonne connaissance du modèle de glissement, la méthode (Hutchinson, 1984) permet d'évaluer l'influence d'une charge sur la stabilité. Cela permet au projeteur de déterminer l'emplacement et la répartition les plus efficaces des déblais ou remblais correctifs, ainsi que l'effet de modification de charge en toute partie de la masse du glissement.

Une condition préalable à la réussite de ces méthodes est une définition satisfaisante de la géométrie et du mécanisme du glissement. Par exemple, au barrage Polyphyton (Grèce), des excavations débutèrent avant que des reconnaissances probantes du glissement aient été exécutées, et n'eurent aucun effet bénéfique (Riemer, 1992).

Risbermes et butées de pied

Des risbermes sont habituellement construites au pied d'un versant pour augmenter la résistance au glissement. Des butées sont réalisées pour obtenir une résistance au cisaillement au pied du versant. On peut citer comme exemples bien connus : Tablachaca (Annexe A-2) et Jackson Creek (Gillon *et al*, 1992), Thissavros en Grèce, et Le Verney en France (Comité Français des Grands Barrages, 1982).

General reviews of methods of landslide stabilisation have been given by Hutchinson (1977), Zaruba & Mencl (1982), Bromhead (1992), Riemer (1992), Schuster (1992), Fell (1994), and Holtz & Schuster (1996), among others. The following section emphasises those measures that have been used at reservoir projects, and special considerations necessary for these types of developments.

For convenience, the available methods are discussed separately under the categories provided in Table 3. However, in many cases stabilisation measures are used in combination in order to optimise the engineering solution. One example is Chicoasen Dam in Mexico (Espinosa & Bernal, 1982) where structures were relocated, slopes were drained, bolted and excavated, and blasting was controlled.

For large landslides the most cost-effective stabilisation solutions usually involve drainage and infiltration protection. It is necessary to consider not only the entire slope, but also the individual lobes of the landslide. This approach allows treatment to be targeted to gain the greatest benefit. Often, a significant enhancement of stability may be obtained from treatment of only a relatively small part of the slope.

9.3.1. Modification of slope geometry

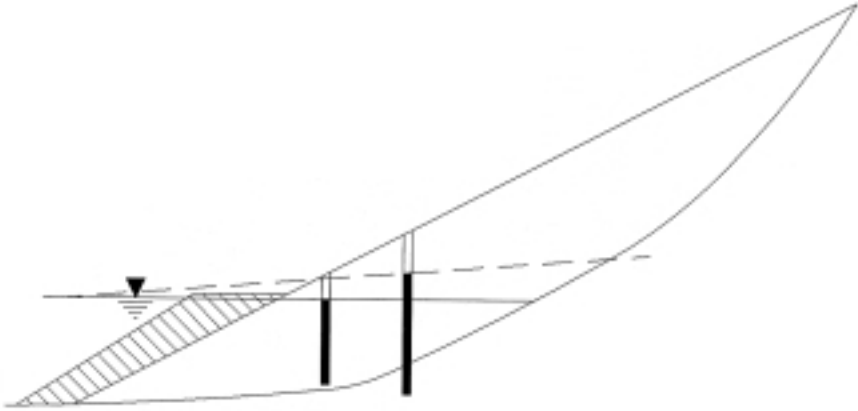
Modification of slope geometry either by placement of stabilising berms (buttresses) or by excavation of all or part of the slope, is an efficient method of slope stabilisation for small to medium sized slides. This method of stabilisation is often particularly amenable for use during dam construction projects because of the availability of construction equipment, excess materials from excavations or a requirement for dam fill materials.

The “ influence line ” concept can be used for rapid assessment of the effects of a proposed slope modification. Provided that there is good knowledge of the slide model, the method (Hutchinson, 1984) allows evaluation of the effect of an influence load on stability. This enables the designer to determine the most effective location and distribution of corrective cuts or fills, and the effect of changing the load in any part of the slide mass.

A prerequisite for success of these methods is an adequate definition of geometry and slide mechanism. For instance, at Polyphyton Dam, Greece, excavation started before a conclusive investigation of the slide had been carried out, and had no beneficial effect (Riemer, 1992).

Toe berms and buttresses

Berms are usually placed on the toe of a slope to increase the resistance to sliding. Buttresses are placed to provide shear resistance at the toe of the slope. Well known examples include the Tablachaca (Appendix A-2) and Jackson Creek (Gillon *et al*, 1992) projects, Thissavros in Greece and Le Verney in France (Comité Français des Grands Barrages, 1982).



Des risbermes et butées conviennent en particulier aux retenues, du fait que des mesures de maîtrise de l'érosion, telles que riprap ou aplanissement d'une zone de rivage, peuvent y être facilement incorporées. Les effets nuisibles d'une vidange rapide peuvent parfois être maîtrisés en incorporant des filtres ou des matériaux drainants dans la risberme. Inversement, l'exécution de risbermes ou tapis, constitués de matériaux moins perméables, contribue à réduire les infiltrations provenant de la retenue et donc à augmenter la stabilité de versants drainés à l'arrière. Par exemple, au glissement Brewery Creek, l'adoption d'un tapis et d'un rideau d'injection pour réduire les infiltrations dans le versant fut capitale pour la réussite du drainage profond de pied, destiné à maintenir les niveaux piézométriques au-dessous du niveau de retenue (Gillon *et al*, 1992).

Des butées de pied sont très efficaces pour la stabilisation d'un lobe critique au pied d'un grand glissement (par exemple, Jackson Creek Slide ; Gillon *et al*, 1992). Cette mesure peut prévenir le glissement de la masse totale. Le confortement de pied est également efficace lorsque le drainage est insuffisant à lui seul.

La différence de comportement du versant et de la butée, concernant l'évolution des déformations-contraintes dans le temps, doit être prise en considération. Aussi, un certain temps et un certain déplacement peuvent-ils être nécessaires pour développer la pleine résistance au cisaillement d'une butée. Également, la poussée d'Archimède due à la submersion par la retenue réduira le poids effectif des risbermes et des butées situées au-dessous du niveau de retenue.

Dans des vallées étroites, les risbermes rétréciront l'écoulement de la rivière et, si elles sont situées à proximité d'autres ouvrages, elles pourront entraver l'entrée de l'eau dans les prises. Des excavations sur la rive opposée de la vallée (Tablachaca ; Annexe A-2), ou des murs de soutènement (Bujak *et al*, 1967), peuvent contribuer à résoudre ces problèmes. La construction des butées peut être réalisée pendant ou après le remplissage de la retenue afin d'éviter d'entraver l'écoulement naturel de la rivière (par exemple, Glissement Cromwell, Aménagement hydroélectrique de Clyde).

Fig. 13
Stabilisation using a toe berm
Stabilisation au moyen d'une risberme de pied

Berms and buttresses are particularly suitable for reservoir development because erosion control measures, such as riprap or flattening of a beach area, can be readily incorporated. The adverse effects of rapid drawdown can sometimes be offset by incorporating filters or rapidly draining materials in the berm. Conversely, berms or blankets can be constructed from less permeable materials to help reduce leakage from reservoirs and thereby increase stability of downstream or back-drained slopes. For example, at Brewery Creek Slide, use of a blanket and grout curtain to reduce infiltration into the slope was crucial to the success of deep toe drainage installed to maintain piezometric levels below reservoir level (Gillon *et al*, 1992).

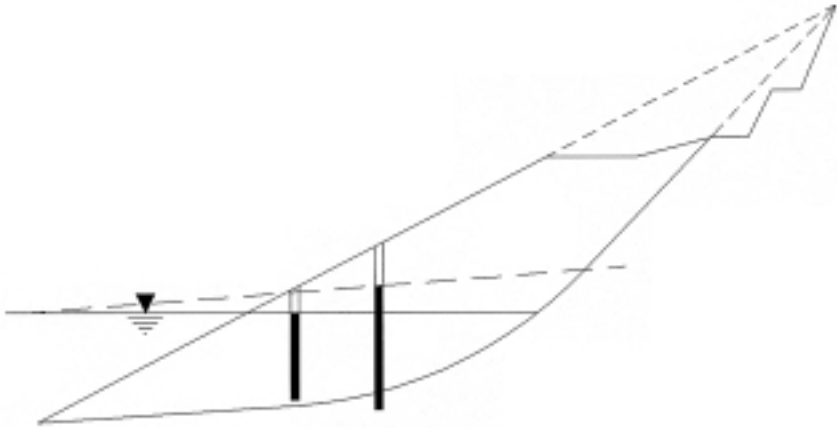
Toe buttresses are very effective when used to stabilise a critical toe lobe of a large landslide (e.g. Jackson Creek Slide; Gillon *et al*, 1992). This may prevent movement of the total slide mass. Toe support is also effective where drainage may be insufficient on its own.

The difference in the stress-strain-time behaviour of the slope and buttress must be considered. Therefore both time and displacement may be required to develop the full shear strength of a buttress. Also, buoyancy due to reservoir inundation will reduce the effective weight of berms and buttresses below reservoir level.

In narrow valleys, berms will constrict river flow and, if close to other facilities, can obstruct flow into water intakes. Excavation of the opposite side of the valley (Tablachaca; Appendix A-2) or retention walls (Bujak *et al*, 1967) can help solve these problems. Buttress construction can be done during or after reservoir filling to avoid the problem of obstruction of natural river flows (e.g. Cromwell Slide, Clyde Power Project).

Excavations

Des excavations sont également souvent exécutées sur des versants pour réduire le rapport forces motrices/forces résistantes, soit par une réduction de pente de l'ensemble du versant en question, soit par un déchargement dans la partie haute du versant où la surface de glissement est souvent relativement raide. Au barrage de Cortes (Valence, Espagne), les matériaux du glissement La Cantera furent enlevés dans la partie supérieure de la zone glissante et placés à sa base pour améliorer la stabilité (Lopez Marinas *et al*, 1997). Au barrage d'Arenos (Espagne), un glissement très lent au-dessus de la prise de fond fut stabilisé en enlevant simplement 40 000 m³ environ de matériaux de la partie supérieure du glissement (Pastor & Cifres, 1998).



L'étude de l'excavation dans un versant devra toujours examiner le problème de la stabilité du versant derrière et au-dessus de la zone à enlever. Il y a de nombreux exemples où une excavation beaucoup plus importante que prévu a été nécessaire, la zone concernée ayant beaucoup augmenté.

Au barrage de Furnas (Brésil), une chute de roche (Szpilman & Ren, 1976) attira l'attention sur l'instabilité de gros blocs de quartzite altéré dans la retenue. Ces blocs étaient de taille suffisante pour produire des ondes de translation susceptibles de déverser sur le barrage et de causer de sérieux dégâts. Ces blocs furent par la suite excavés (Miguez de Mello, 1985).

Un effet négatif résultant de la modification de géométrie d'un versant est qu'elle peut créer une vue désagréable sur le paysage.

9.3.2. Drainage et protection contre les infiltrations

Drainage

Le drainage et la maîtrise de l'eau de surface sont en général les moyens les plus efficaces et économiques pour stabiliser les versants, et ils ont été largement utilisés.

Excavation

Slope excavation is also widely used to reduce the ratio of driving forces to resisting forces, either by an overall flattening of the slope or by unloading the head of the slope where the slip surface is often relatively steep. At Cortes Dam, Valencia (Spain), the La Cantera landslide material was removed from the upper slopes and placed at the toe of the moving slide mass to improve stability (Lopez Marinas *et al*, 1997). At Arenos Dam (Spain), a creeping landslide above the bottom intake was stabilised simply by removing about 40 000 m³ from the head area (Pastor & Cifres, 1998).

Fig. 14

Stabilisation by head unloading

Stabilisation par déchargement dans la partie supérieure

The design of the slope excavation should always consider the stability of the slope behind or above the area to be removed. There are numerous examples in which far more excavation has been required than anticipated and the area involved has become greatly enlarged.

At the Furnas Dam in Brazil a rockfall (Szpilman & Ren, 1976) drew attention to large unstable blocks of weathered quartzite within the reservoir. These blocks were of a sufficient size to generate impulse waves that could overtop the dam and cause serious damage. The unstable blocks were subsequently excavated (Miguez de Mello, 1985).

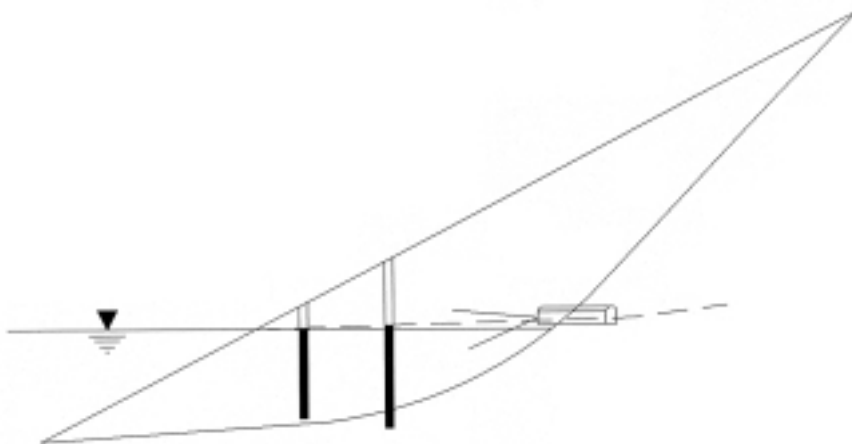
An adverse effect of modifying slope geometry to stabilise a slope is that it can create a large and unsightly impact on the physical environment.

9.3.2. Drainage and infiltration protection

Drainage

Drainage and surface water control are usually the most effective and economic means of stabilising slopes and they have been widely employed.

Pour les glissements importants et très profonds, des systèmes de galeries et de forages permettant un drainage par gravité jusqu'à un niveau proche de celui de la retenue se sont avérés particulièrement efficaces. On peut citer comme exemples, Revelstoke et Mica (Moore *et al*, 1982), Tablachaca (Pérou), Lazaro Cardenas (Mexique), Grand'Maison (France), Schräh (Suisse), Cromwell Gorge (Nouvelle-Zélande), entre autres.



Une bonne connaissance des conditions géologiques et de la nappe phréatique est nécessaire pour la réussite de ces systèmes de drainage. Ces conditions sont souvent complexes, avec de multiples surfaces de glissement courbes, des failles et une stratigraphie variable, des changements d'ordre de grandeur des perméabilités, et des régimes de pression compartimentés. Heureusement, la méthode des observations peut souvent être utilisée, de sorte que les informations recueillies, non seulement pendant les reconnaissances mais également au cours de la mise en place du système, peuvent être utilisées pour adapter le projet aux conditions réelles rencontrées.

Au cours de la mise au point des mesures de drainage, on doit tenir compte de l'effet des forces de percolation en effectuant un calcul approprié des contraintes effectives.

La souplesse des systèmes de drainage fournit un avantage particulier. Le nombre, les longueurs et les orientations des forages de drainage peuvent être ajustés, et les galeries peuvent être allongées, modifiées en direction, ou arrêtées en cours de construction.

Des appareils de mesures avant construction sont un investissement nécessaire, permettant de vérifier que le système n'est ni excessif, ni inapproprié, et, si nécessaire, de démontrer aux Autorités de Contrôle que la stabilité a été obtenue.

Le drainage par gravité est particulièrement efficace pour faire face aux effets de la submersion causée par la retenue ; il peut être utilisé non seulement pour abaisser les pressions d'eau existantes, mais également pour limiter l'élévation des pressions d'eau dans le versant pouvant être causée par le remplissage. Des mesures

For large and very deep slides, systems of drainage tunnels and drainholes that allow gravity drainage to about reservoir level have proven particularly effective. Examples are Revelstoke and Mica (Moore *et al*, 1982), Tablachaca in Peru, Lazaro Cardenas in Mexico, Grand'Maison in France, Schräh in Switzerland and the Cromwell Gorge (Clyde) slides in New Zealand, among others.

Fig. 15
Stabilisation by drainage tunnels and drainholes
Stabilisation par galeries et forages de drainage

An adequate understanding of geological and groundwater conditions is critical to the success of these types of drainage systems. These critical conditions are often complex with multiple, curved slip surfaces, faults and variable stratigraphy, order of magnitude changes in permeability, and compartmentalised pressure regimes. Fortunately, an observational approach can often be employed so that the information gained, not only during the investigation but also during the construction of the system, can be used to tailor the design to the conditions actually encountered.

In developing drainage measures, consideration must be given to the effect of seepage forces by proper effective stress analysis.

The flexibility of drainage systems provides a distinctive advantage. The numbers, lengths and orientations of drainholes can be adjusted, and tunnels can be lengthened, changed in direction or stopped during construction.

Preconstruction instrumentation is usually a necessary investment to help ensure that the system is neither excessive nor inadequate and if necessary, to demonstrate to Regulatory Authorities that stability has been achieved.

Gravity drainage is particularly effective in offsetting the effects of reservoir inundation because it can be used not only to lower the existing water pressures above reservoir level but also to limit the rise of water pressures in the slope that can be caused by filling. Well designed drainage measures are also an

de drainage bien conçues sont également efficaces pour diminuer ou éliminer les effets défavorables de la vidange d'une retenue.

Dans certains cas, le drainage peut être effectué au-dessous du niveau de la retenue, si les volumes drainés sont acceptables. Par exemple, le glissement Brewery Creek a un drainage profond par pompage, associé à un tapis et à un rideau d'injection destinés à réduire les débits de percolation provenant de la retenue, l'ensemble ayant été conçu pour maîtriser les niveaux de la nappe phréatique au pied (Gillon *et al*, 1992). Au glissement Clyde, une galerie de drainage par gravité a été creusée à un niveau bas, avec évacuation à l'aval de l'appui du barrage, pour maintenir bas les niveaux de la nappe phréatique au pied du glissement (Foster *et al*, 1996).

Réduction des infiltrations et maîtrise des ruissellements

Les méthodes classiques de maîtrise des eaux de surface sont généralement appropriées et ont été largement utilisées sur les versants de retenues. L'étanchement de la surface, le drainage en surface, et l'engazonnement ou le reboisement contribuent à maîtriser les infiltrations et l'augmentation des forces déstabilisatrices dues à la nappe phréatique à l'intérieur et au-dessous du glissement. Du béton projeté a été appliqué pour colmater des fractures du rocher au barrage de Kariba (Lane, 1970). Des composés bitumineux et des géomembranes ont été également utilisés (Gillon & Saul, 1996). L'eau ruisselant en surface peut être éloignée des zones instables au moyen de fossés ou de digues, ou acheminée à travers les zones dans des canaux étanches, ce qui réduit les infiltrations et l'érosion de surface qui sans cela pourraient déclencher des mouvements plus importants.

Comme indiqué par Popescu (1996), « des considérations environnementales sont devenues de plus en plus un facteur important dans le choix de mesures correctives appropriées, en particulier des questions comme l'intrusion visuelle dans le paysage ou l'impact sur la conservation de la nature ou de la géologie ». La stabilisation de versants par bio-corrrection, souvent en association avec des éléments créés par l'homme, est de plus en plus utilisée. L'utilisation de végétation non seulement contribue à réduire les infiltrations et à maîtriser les ruissellements, mais assure également une protection de la surface contre l'érosion.

Au glissement de Cairnmuir, une reconstitution de la végétation fut adoptée pour réduire les infiltrations et préserver la couverture de sol fragile au-dessus des débris constituant le glissement. Dans des zones plus critiques, des travaux d'étanchéité de surface et de drainage ont été réalisés pour orienter les ruissellements dans une nouvelle direction (Gillon & Saul, 1996).

9.3.3. Ouvrages de soutènement

Les ouvrages de soutènement sont parmi les solutions techniques les plus classiques pour résoudre les problèmes d'instabilité, et ils sont utilisés le long de retenues de la même façon qu'ils le sont ailleurs. Les divers types d'ouvrages de soutènement susceptibles d'être adoptés sont traités de façon détaillée dans d'autres documents (par exemple, Reeves, 1982). Alors qu'ils ne conviennent pas pour la stabilisation de très grands glissements, ils peuvent par contre être utilisés le long

effective means for lessening or eliminating the adverse effects of reservoir drawdown.

In some cases, drainage can be carried out below reservoir level, provided flow volumes are acceptable. For example, the Brewery Creek Slide has deep pumped drainage, in conjunction with a blanket and grout curtain to reduce flows from the lake, to control groundwater levels at the toe (Gillon *et al*, 1992). The Clyde Slide uses a low level gravity drainage tunnel that discharges downstream from the dam abutment to maintain low groundwater levels at the toe (Foster *et al*, 1996).

Infiltration reduction and runoff control

The normal methods of controlling surface water are generally appropriate and have been used widely on reservoir slopes. Sealing of the surface, surface drainage and grassing or reforestation help to control infiltration and building of destabilising groundwater forces within and beneath the slide mass. Shotcrete was applied to seal rock fractures at Kariba Dam (e.g. Lane, 1970). Bituminous compounds and geomembranes have also been used (Gillon & Saul, 1996). Surface water can be diverted away from unstable areas in ditches or by dykes, or conducted across areas in sealed channels, reducing infiltration and surface erosion that could otherwise trigger larger movements.

As stated by Popescu (1996), “ environmental considerations have increasingly become an important factor in the choice of suitable remedial measures, particularly issues such as visual intrusion in scenic areas or the impact on nature or geological conservation interests. ” Slope stabilisation by bio-remediation, often in conjunction with man-made elements, is being more and more used. This use of vegetation not only assists with infiltration reduction and runoff control, but provides surface erosion protection.

At Cairnmuir Slide, re-vegetation was used to reduce infiltration by preserving the fragile soil cover overlying the slide debris. Surface sealing and drainage works were used to redirect runoff in more critical areas (Gillon & Saul, 1996).

9.3.3. Retaining structures

Retaining structures are some of the more traditional engineered solutions to slope stability problems, and they are used along reservoirs in the same way as they are used elsewhere. The several types of retaining structures that can be used are extensively discussed elsewhere (e.g. Reeves, 1982). While not appropriate for stabilising very large slides, retaining structures can be used along shorelines to control erosion as well as sliding. Walls are often used to provide room for other

des rives de retenue pour maîtriser l'érosion ainsi que des mouvements de glissement. Des murs sont souvent construits en vue de constituer un emplacement pour d'autres ouvrages de l'aménagement lorsqu'ils sont adjacents à des zones instables d'un versant. Pour les retenues, des aspects particuliers comprennent des dispositions concernant l'exploitation de la retenue, en particulier les vidanges rapides, et concernant l'érosion des rives.

9.3.4. Renforcement interne de versants

Des techniques de renforcement interne de versants sont également largement utilisées pour traiter des problèmes d'instabilité de versants de retenues. Il existe un grand nombre de techniques disponibles (Tableau 3).

Sur l'aménagement de Revelstoke, en vue de stabiliser les détritiques, un système de tirants fut installé dans un versant presque vertical, depuis une plate-forme suspendue à une grue, au-dessus de la prise d'eau de la galerie de dérivation (Moore & Imrie, 1982).

À l'aménagement de transfert d'énergie par pompage de Rönkhausen, des tirants précontraints furent choisis pour la stabilisation, en raison du manque de place pour la construction d'une butée de pied, solution moins coûteuse. Des tirants furent aussi installés pour la stabilisation de versants aux barrages Libby et McKay's Point (États-Unis), Chicoasen (Mexique), El Atazar (Espagne), Tablachaca (Pérou), et Amaluzza (Équateur) – Riemer 1992.

Les tirants sont relativement coûteux et leur utilisation est donc, en général, limitée à des situations nécessitant le renforcement rapide de volumes relativement faibles de roche dure, ou faisant appel à cette technique lorsque d'autres moyens ne sont pas praticables. Leur durabilité à long terme et la nécessité de leur auscultation doivent être prises en compte.

9.3.5. Autres mesures de stabilisation

Protection contre l'érosion

L'érosion par les ondes et le courant peuvent conduire à un glissement étendu le long des rives d'une retenue, de même qu'à un alluvionnement et des dommages à l'environnement. Pour ces problèmes, les techniques de protection appliquées aux rivages de lacs naturels et d'océans sont utilisées. D'intéressants exemples provenant de Sibérie ont été examinés par Savkin (1977) qui avertit qu'« ...une protection construite sans une étude technique satisfaisante des conditions hydrologiques et géologiques-géomorphologiques de tronçons spécifiques de la rive a peu d'effet et est éphémère ». Mikhailov *et al* (1982) ont préconisé une « Méthode d'Analogues Naturels » dans laquelle la conception de protection par création de rives artificielles suit les exemples de la nature.

Submersion

Une méthode corrective qui est probablement unique dans le domaine des retenues est la submersion. La submersion peut arrêter l'érosion fluviale et conduire

project facilities where they are adjacent to slope instabilities. For reservoirs, special design considerations include provision for reservoir operations, especially rapid drawdowns, and for shoreline erosion.

9.3.4. Internal slope reinforcement

Internal slope reinforcement techniques are also widely used to remediate slope stability problems associated with reservoirs. There are a large number of techniques readily available (Table 3).

On the Revelstoke Project, a system of anchors was installed into a nearly vertical slope from a platform suspended from a crane above the operating diversion tunnel intake to stabilise the debris (Moore & Imrie, 1982).

For the Rönkhausen pumped storage scheme, prestressed anchors were selected for stabilisation because of lack of space for the cheaper alternative of a toe buttress. Anchors were also installed for slope stabilisation at Libby and McKay's Point dams in the USA, at Chicoasen in Mexico, El Atazar in Spain, Tablachaca in Peru, and Amaluza in Ecuador (Riemer, 1992).

Anchors are comparatively expensive and their use is therefore normally limited to situations that require rapid support for relatively small volumes of hard rock or that call for a flexible response where other means are not practicable. Their long-term durability and requirement for monitoring must be considered.

9.3.5. Other stabilisation measures

Erosion protection

Wave and current erosion can lead to extensive sliding along reservoir shores, as well as sedimentation and environmental damage. For these problems, the techniques for protection of natural lake and ocean shorelines are employed. Useful examples from Siberia were discussed by Savkin (1977) who warned that " ... protection built without a proper engineering study of the hydrologic and geologic-geomorphological conditions of specific segments of the shore has little effect and is short-lived ". Mikhailov *et al* (1982) advocated a " Method of Natural Analogs ", wherein the design of artificial shoreline protection follows the examples of nature.

Inundation

One remedial method which is probably unique to reservoir projects is inundation. Inundation can stop river erosion and lead to slide stabilisation

à la stabilisation d'un glissement (Baumer, 1988), la pression d'eau de la retenue sur le pied d'un glissement pouvant avoir également un effet bénéfique. Le long de la rivière Madawaska, au Canada, des glissements étendus résultaient des débits élevés et variables provenant d'une usine hydroélectrique située à l'amont; l'activité principale de ces glissements fut arrêtée par la construction d'un autre barrage à l'aval, à Arnprior (Peggs & Valliappan, 1992).

Cependant, ces situations sont particulières et les effets décrits dans le sous-chapitre 3.2. doivent être pris en considération.

Protection contre les effets à distance

Les percolations provenant d'une retenue peuvent induire une instabilité à l'aval, ou une instabilité dans une vallée adjacente. Les solutions classiques de protection comprennent : des injections, des murs parafoilles s'opposant aux percolations, des tapis amont et des trous de drainage aval, des puits et des tranchées, dispositifs utilisés à Samanalawewa au Sri Lanka (Pereira, 1995), à Colbun au Chili (Noguera & Garcès, 1988), à Frayle au Pérou (Jaeger, 1972), et ailleurs.

La solution inhabituelle d'un entretoisement entre les rives du canyon fut proposée à Gmünd (Autriche) mais, en définitive, des travaux beaucoup plus vastes furent exécutés pour prévenir une instabilité du canyon à l'aval du barrage après le remplissage de la retenue (Horninger & Kropatschek, 1967). La technique consistant à ajouter de la chaux à un versant contenant de la montmorillonite sodique fut utilisée à l'aval de la retenue Lages, au Brésil (Cabrera, 1992).

Maîtrise de la distance de parcours du glissement

Un certain nombre de mesures peuvent être utilisées pour réduire les effets du mouvement de masse, en maîtrisant sa distance de parcours. Dans le cas de retenues, ces mesures sont habituellement destinées à arrêter les matériaux avant qu'ils atteignent la retenue ou les ouvrages hydrauliques.

Ces mesures correctives comprennent :

- Des seuils sur le sol,
- Des barrages de correction,
- Des barrages avec cellules en acier et des barrages en treillis,
- Des écrans constituant des obstacles sur les coulées de détrit.

Des références détaillées relatives à ces mesures sont fournies par « United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1996 ».

9.4. RESTRICTIONS APPORTÉES À L'EXPLOITATION DE LA RETENUE

9.4.1. Mise en eau de la retenue

L'effet de la mise en eau d'une retenue sur les versants et l'efficacité des mesures correctives sont souvent très incertains, en particulier si les conditions

(Baumer, 1988) as can the pressure of reservoir water on the toe of a slide. Along the Madawaska River in Canada, extensive sliding which was due to fluctuations and large flows from an upstream hydroelectric plant, was remedied with the building of another dam downstream at Arnprior (Peggs & Valliappan, 1992).

However these are particular situations and the effects described in Section 3.2 should be taken into consideration.

Protection against remote effects

Seepage from the reservoir may induce downstream instability, or instability in an adjacent valley. Typical solutions are grouting, seepage cut-off walls, upstream blankets and downstream drainholes, wells and trenches as used at Samanalawewa in Sri Lanka (Pereira, 1995), at Colbun in Chile (Noguera & Garcès, 1988), Frayle in Peru (Jaeger, 1972) and elsewhere.

The unusual solution of a strut from one side of the canyon to the other was proposed at Gmünd in Austria but eventually much more extensive works were installed to prevent instability of the canyon downstream from the dam after reservoir filling (Horninger & Kropatschek, 1967). The technique of adding lime to a slope containing sodium montmorillonite was employed downstream from the Lages Reservoir in Brazil (Cabrera, 1992).

Control of reach

There are a number of measures, which can be utilised to minimise the effects of mass movement by controlling the reach of the mass. For reservoirs these measures are usually used to stop material before it reach the reservoir or the hydraulic structures.

Remedial measures include :

- Ground sills,
- Check dams,
- Steel cell barrages and lattice dams,
- Debris flow breaker screens.

A comprehensive reference for these measures is United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1996.

9.4. RESTRICTIONS TO RESERVOIR OPERATIONS

9.4.1. Lake filling

The effect of reservoir filling on slopes and the effectiveness of remedial measures are often quite uncertain, especially if geological and/or groundwater

géologiques et/ou de nappe phréatique sont complexes ou insuffisamment connues. L'augmentation du risque d'instabilité de versant au cours du remplissage initial peut être réduite en adoptant un programme de remplissage par étapes, ou sinon contrôlé.

La mise en eau de la retenue de Revelstoke fut arrêtée à 9 m puis à 5 m au-dessous du niveau normal de retenue, jusqu'à ce que les effets de la retenue sur le glissement Downie et l'efficacité du système de drainage puissent être déterminés et démontrés aux autorités de contrôle. De même, la retenue de Clyde fut mise en eau par étapes (Gillon *et al*, 1997) pour permettre aux versants de parvenir à un équilibre et pour confirmer l'efficacité des mesures correctives, avant de poursuivre le remplissage. Un autre exemple est la retenue de Gepatsch où la mise en eau contrôlée permit au glissement d'atteindre un nouvel équilibre au cours du remplissage (Lauffer *et al*, 1967).

Cette technique est spécialement utile lorsque les dégâts susceptibles d'être causés par les ondes résultant d'un glissement seront atténués en maintenant une revanche plus grande jusqu'à ce que l'on démontre que les versants à risque se sont équilibrés et se comportent à l'intérieur de limites acceptables. Sous réserve que le remplissage soit suffisamment lent, des observations peuvent être effectuées et les mesures correctives accrues, si cela s'avère nécessaire (Bujak *et al*, 1967).

Une mise en eau de la retenue par étapes et l'adoption d'une revanche plus grande ont des répercussions sur la conception du barrage et des ouvrages d'évacuation, comme indiqué dans le chapitre 9.1.

Si un remplissage de la retenue par étapes est adopté pour permettre d'évaluer les réponses du versant et faciliter les travaux de correction, cela devient une activité importante à gérer (voir chapitre 4.3.1.). L'évaluation de la réponse du versant implique la vérification des modèles de versant (voir chapitre 6.5.). Les étapes de remplissage de la retenue doivent laisser suffisamment de temps pour que la nappe phréatique s'équilibre avec le niveau de la retenue, pour que les réponses du glissement à l'augmentation de la submersion puissent être mesurées, et pour que la documentation puisse être rassemblée et les réponses du versant évaluées.

9.4.2. Exploitation

Les restrictions pouvant être apportées à l'exploitation d'une retenue afin de faire face à certains problèmes d'instabilité de versant comprennent : la réduction de l'amplitude et de la vitesse de vidange, et la réduction du niveau de retenue lors de conditions climatiques propices à des glissements de terrain. De telles restrictions peuvent être souvent atténuées ou supprimées après que le premier remplissage et les vidanges aient indiqué que la stabilité du versant est satisfaisante sous les conditions critiques prévisibles (Baumer, 1988). Cependant, les versants contenant des argiles fortement préconsolidées tendent à perdre de la résistance sous l'effet des variations du niveau de retenue.

Bien entendu, tout aménagement est plus vulnérable à une onde de translation lorsque la retenue est à son niveau maximal d'exploitation. En général, la revanche d'un barrage ne dépasse pas 1 – 3 mètres environ. Au cours d'une période critique, par exemple en hiver lorsque des avalanches de neige soudaines peuvent glisser

conditions are complex or not well known. The increased risk of slope instability during initial filling can be reduced by a staged, or otherwise controlled, filling programme.

Filling of the Revelstoke Reservoir was halted at 9 m and again at 5 m below full pool during the first filling until the effect of the reservoir on Downie Slide and the effectiveness of the drainage system could be determined and demonstrated to government regulators. Similarly, filling of the Clyde Reservoir was staged (Gillon *et al*, 1997) to allow slopes to equilibrate and to confirm the effectiveness of remedial works prior to further raising. Another good example is Gepatsch where controlled filling allowed the slide to reach a new equilibrium as the reservoir was raised (Lauffer *et al*, 1967).

This technique is especially useful where damage from the slide generated waves would be lessened by maintaining greater freeboard until slopes at risk can be shown to have equilibrated and to behave within acceptable limits. Provided the filling is slow enough, observations can be made and remedial measures increased, if they are found to be necessary (Bujak *et al*, 1967).

A staged lake filling operation and the utilisation of increased freeboard has implications for the design of the dam and outlet works as referred to in Section 9.1.

If a staged lake filling is utilised to allow evaluation of the slope responses and facilitate any remedial action, this becomes a significant activity to resource and manage (see Section 4.3.1). Evaluation of the slope response involves verification of the slope models (see Section 6.5). The lake filling stages need to allow time for equilibration of groundwater with lake level rises, measuring the slide responses to increased inundation, and the documentation and evaluation of the slope responses.

9.4.2. Operations

Operational restrictions that can be considered for remediating certain slope stability problems include restricting drawdown levels and rates, and restricting reservoir levels during climatic conditions conducive to landslides. Such restrictions can often be relaxed or removed after the first test fillings and drawdowns have shown the slope stability to be adequate under critical foreseeable conditions (Baumer, 1988). However, reservoir slopes containing highly preconsolidated clays tend to lose strength due to reservoir fluctuation.

Clearly, any project is most vulnerable to an impulse wave when the reservoir is at maximum operating level. Generally, dam freeboard is not more than about one to three metres. During a critical phase, as in winter when sudden snow avalanches could slide into a reservoir or when the reservoir is endangered by an acute

dans une retenue, ou lorsque la retenue est menacée par un important glissement de terrain, des mesures d'atténuation, par exemple une vidange partielle, peuvent être nécessaires pour obtenir une revanche convenable. Dans certains cas, la vidange est une opération critique susceptible de déclencher un nouveau glissement ou d'augmenter les mouvements d'un versant. Cela doit être pris en compte lors de la détermination des vitesses admissibles de vidange.

À Grand'Maison (France), une revanche plus grande est assurée au cours de la période de fonte des neiges. Elle est maintenue au-delà de cette période si les niveaux piézométriques sont supérieurs aux seuils définis.

9.5. RESTRICTIONS APPORTÉES À L'UTILISATION DES SOLS

Afin de réduire les dégâts susceptibles de résulter d'une instabilité de versant de retenue, il peut être nécessaire de restreindre l'accès à la retenue, au pourtour de la retenue et aux zones aval pouvant être affectés par des glissements, des ondes ou des submersions. Au cours du développement du projet, des lignes délimitant les zones où l'utilisation du sol est restreinte, telles que des lignes de sécurité résidentielles, seront établies. Des terrains privés peuvent être achetés ou des droits d'usage acquis, comme dans le cas du barrage Chief Joseph, aux États-Unis (Galster, 1991).

En général, la gestion de l'utilisation des sols autour des retenues devient une question de plus en plus importante et complexe. Pour cette raison, des « Lignes d'Impact », indiquant l'impact de la retenue sur la stabilité du versant, la nappe phréatique, la submersion et l'érosion (Tableau 4), ont été utilisées pour la gestion de l'utilisation des sols en Colombie Britannique. Ayant été établies sur une base technique, plutôt que sur la base d'utilisation de terrain existante, ces « Lignes » sont devenues de plus en plus utiles pour l'examen des problèmes d'utilisation des sols le long du pourtour de retenues.

Les restrictions apportées à l'utilisation des sols doivent être adaptées à la situation particulière. Lorsqu'un glissement ou des ondes engendrées par un glissement peuvent être soudains et causer des pertes de vies humaines, les habitations peuvent être interdites, mais d'autres usages permis. Une restriction des activités susceptibles de conduire à une instabilité de versant, telles que l'exploitation de carrières, sera également soigneusement examinée. De même, si la stabilité de versant est sensible aux niveaux de la nappe phréatique, l'irrigation ou la sylviculture peut être restreinte, mais l'utilisation à des fins de loisirs permise. Lorsque les risques sont suffisamment faibles, des mesures d'alerte seules peuvent être suffisantes.

Avec l'augmentation de la pression sur l'utilisation à buts multiples des sols et des ressources en eau, la gestion des terres autour des retenues devient une fonction de plus en plus importante ; proportionnellement, les données techniques associées à cette fonction doivent être plus détaillées et complètes. En outre, des solutions, telles que la stabilisation de versant, qui peuvent être coûteuses, deviennent relativement plus attractives que les restrictions d'utilisation des sols, moins coûteuses mais causant probablement plus de nuisances d'ordre humain et environnemental.

potential landslide, mitigation measures, such as partial drawdown, may be required to provide adequate freeboard. In some cases, drawdown is a critical activity that can trigger new or increased slope movements. This must be taken into account when determining allowable rates of drawdown.

At Grand'Maison (France), a larger freeboard is maintained during the snowmelt period. It is maintained beyond the snowmelt period if piezometric levels are above defined thresholds.

9.5. RESTRICTIONS TO LAND USE

To reduce the potential for damage from shoreline instability, access to the reservoir, the reservoir shoreline and downstream areas that could be affected by slides, waves or flooding may have to be restricted. During project development, lines demarcating land use restrictions, such as residential safelines, should be developed. Privately owned land can be purchased or easements obtained as was done for Chief Joseph Dam in USA (Galster, 1991).

Generally, land use management around reservoirs is becoming a more and more complex and important issue. For this reason “ Impact Lines ”, which show the impact of the reservoir on slope stability, groundwater, flooding and erosion (Table 4) have been used for land use management in British Columbia. Because these are developed on a technical basis, rather than on the basis of existing land use, they have become increasingly useful in considering land use issues along shorelines.

Land use restrictions must necessarily be tailored to meet the particular situation. Where sliding or slide generated waves could be sudden and cause loss of life, habitation could be forbidden but other usages allowed. Restriction of activities that could lead to slope instability, such as quarrying, should be thoroughly considered. Similarly, where slope stability is susceptible to groundwater levels, irrigation or forest harvesting could be restricted but recreational use allowed. Where risks are sufficiently low, warning signs alone could be sufficient.

With the increasing pressure on the multiple use of land and water resources, land use management of reservoirs and their shorelines is becoming a more and more important function. Technical input to this function has to become proportionally more comprehensive. In addition, solutions such as slope stabilisation, which could cost more money, are becoming relatively more attractive than land use restrictions that might cost less but are likely to cause more human and environmental disruption.

Tableau 4

Sommaire des « Lignes d'Impact » relatives à l'utilisation des sols
(d'après BC Hydro)

LIGNE D'IMPACT	DÉFINITION	COMMENTAIRES
LIGNE D'IMPACT SUBMERSION	La limite au-delà de laquelle le terrain adjacent à une retenue ne sera pas submergé pour le niveau normal de retenue ou dans le cas de crues de période de retour de plus de 1 000 ans.	Établie au moyen d'études hydrologiques; définit le terrain directement affecté par la submersion. NOTE : Le niveau de la crue de probabilité 1/200, plus 0,6 m, est adopté par le gouvernement de la Colombie Britannique comme critère pour l'habitation sur les lits majeurs.
LIGNE D'IMPACT STABILITÉ	<p>(i) RÉSIDENTIELLE :</p> <p>La limite au-delà de laquelle le terrain adjacent à une retenue ne sera pas sujet à un glissement soudain sous l'effet de la retenue, avec une probabilité de dépassement annuel de 1/ 10 000. Elle ne sera pas située spécifiquement de sorte que les instabilités existantes non affectées par le remplissage de la retenue seront sur le côté retenue de la limite; celles-ci seront notées là où elles ont été identifiées.</p> <p>Le terrain sujet à des mouvements lents permanents dus à la retenue peut également être inclus sur le côté retenue de la limite, celui-ci ne pouvant servir au développement.</p> <p>(ii) NON-RÉSIDENTIELLE :</p> <p>Semblable à (i) mais ayant un degré de confiance moindre du fait d'un niveau plus faible de données. Le niveau de confiance exigé dépendra de l'utilisation du sol.</p>	<p>Limite géotechnique, pour utilisation dans les zones des rives avec habitations existantes ou proposées, en vue de définir les zones où des vies peuvent être menacées. Une probabilité de dépassement annuelle de 1/ 10 000 est la limite de confiance technique avec des reconnaissances très étendues. Divers niveaux de probabilité peuvent être choisis pour des aménagements spécifiques. Les effets de l'érosion au pied et des séismes sur la stabilité sont considérés.</p> <p>Les lignes non-résidentielles peuvent être tracées pour diverses utilisations, telles que sylviculture, industries ou loisirs; les lignes pour chaque utilisation peuvent correspondre à divers niveaux de probabilité. Si l'utilisation du sol change, les lignes seront revues afin de vérifier que la base technique de leur situation est convenablement justifiée par les informations disponibles.</p>

Table 4
Summary of Impact Lines relevant to land use
(BC Hydro)

IMPACT LINE	DEFINITION	COMMENTS
FLOODING IMPACT LINE	The boundary beyond which land adjacent to a reservoir will not be inundated as a result of normal reservoir or flood events with a return period of more than 1/1000 years.	Established through hydrological studies; defines land directly affected by flooding. NOTE: The 1/200 flood level plus 0.6 m is used by the BC provincial government as the criterion for habitation on flood plains.
STABILITY IMPACT LINE	<p>(i) RESIDENTIAL: The boundary beyond which land adjacent to a reservoir will not be subjected to sudden landsliding due to reservoir action, to an annual probability of exceedence of 1/10 000. It will not be located specifically so that existing instabilities not affected by reservoir impoundment will be on the reservoir side of the boundary; these should be noted where identified. Land subject to slow steady movements due to the reservoir may also be included on the reservoir side of the boundary as it could be useless for development.</p> <p>(ii) NON-RESIDENTIAL: Similar to (i) but having a lesser degree of confidence due to a lower level of data. Required confidence level will depend on land use.</p>	<p>Geotechnical boundary, for use in shoreline sectors with existing or proposed human habitation, to define areas where lives may be threatened. A 1/10 000 annual probability of exceedence is the limit of technical confidence with extremely extensive investigations. Different probability levels may be selected for specific projects. The effects of toe erosion and earthquakes upon stability are considered.</p> <p>Non-residential lines can be drawn for various uses such as forestry, industrial or recreational; lines for each use could correspond to different probability levels. If land use changes, lines should be reviewed to ensure the technical basis of their location is adequately justified by the available information.</p>

LIGNE D'IMPACT	DÉFINITION	COMMENTAIRES
LIGNE D'IMPACT ÉROSION	<p>La limite au-delà de laquelle le terrain adjacent à une retenue ne subira pas d'érosion régressive causée par une action normale de la retenue.</p> <p>Une telle action inclut l'érosion provoquée par des tempêtes; la période de retour pour les ondes de tempête sera déterminée pour chaque retenue.</p> <p>La limite ne sera pas située spécifiquement afin d'inclure les conséquences des processus d'érosion existants non affectés par le remplissage de la retenue; celles-ci seront notées là où elles ont été identifiées.</p>	<p>Cette érosion ne menace pas la vie, sa vitesse étant généralement faible. Cette limite géotechnique définit l'augmentation ou la diminution nette des zones soumises à une régression par érosion. Les critères ne présenteront pas un excès de prudence, étant donné que le processus d'érosion ne constitue pas un danger pour la vie. L'érosion peut souvent être maîtrisée par des travaux de protection; les lignes d'impact peuvent être établies pour des rives protégées et non protégées.</p>
LIGNE D'IMPACT NAPPE PHRÉATIQUE	<p>La limite au-delà de laquelle les niveaux de nappe phréatique adjacents aux rives d'une retenue ne sont pas affectés de manière significative par la retenue.</p>	<p>L'influence des variations de la nappe phréatique sur l'utilisation des sols et l'utilisation des eaux souterraines, actuellement et dans le futur, sera étudiée. Les effets d'une augmentation des niveaux de nappe phréatique sur la stabilité du versant seront inclus dans la « Ligne d'Impact Stabilité » et ne figureront pas ici.</p>
LIGNE D'IMPACT ONDES PRODUITES PAR UN GLISSEMENT	<p>La limite au-delà de laquelle les ondes produites par un glissement de terrain dans une retenue ne causeront pas d'érosion ou d'autres dégâts. La probabilité d'occurrence d'un glissement sera la même que celle adoptée dans le cas de la « Ligne d'Impact Stabilité » pour la zone de glissement. Pour les glissements potentiels, non causés ou non influencés par la retenue, mais dont les impacts seront transmis du fait de la présence de la retenue, la probabilité d'occurrence sera estimée au cas par cas.</p>	<p>Cette ligne est seulement applicable aux tronçons de rive qui subiront les effets des ondes induites par un glissement potentiel. Pour établir cette ligne, on devra estimer le volume et la vitesse du glissement. Une modélisation peut être nécessaire pour déterminer la hauteur de l'onde, son atténuation et le déferlement résultant.</p> <p>Il peut être également nécessaire de considérer les limites d'impact du souffle d'air.</p>

IMPACT LINE	DEFINITION	COMMENTS
EROSION IMPACT LINE	<p>The boundary beyond which land adjacent to a reservoir will not regress due to progressive erosion caused by normal reservoir action. Normal reservoir action includes erosion due to storms; the return period for storm waves will be determined for individual reservoirs.</p> <p>The boundary will not be located specifically to include the results of existing erosive processes not affected by reservoir impoundment; these should be noted where identified.</p>	<p>This erosion does not threaten life as the rate is generally slow. This geotechnical boundary delineates the net increase or decrease of areas subject to regression by erosion. Criteria should not be overconservative as the erosion process is not life threatening. Erosion can often be controlled by protective works; impact lines may be produced for the cases of unprotected and protected shorelines.</p>
GROUND- WATER IMPACT LINE	<p>The boundary beyond which groundwater levels adjacent to a reservoir shoreline are not significantly affected by the presence of the reservoir.</p>	<p>The significance of groundwater changes upon both land use and groundwater use both presently and in the future need to be considered. The impacts of raised groundwater levels upon slope stability are included in the “ Stability Impact Line ” and are not included here.</p>
LANDSLIDE WAVE IMPACT LINE	<p>The boundary beyond which waves produced by a landslide into a reservoir will not cause erosion or other damage. The probability of slide occurrence should be the same as that used for the “ Stability Impact Line ” for the slide area. For potential slides, not caused by or influenced by the reservoir but whose impacts would be transmitted due to the presence of the reservoir, the probability of occurrence should be estimated on a case-by-case basis</p>	<p>This line is only applicable to shoreline segments that would be impacted by a potential slide induced wave. To produce this line, estimates must be made of slide volume and velocity. Modelling may be required to determine wave height, attenuation and the resulting runup. Air blast impact limits may also need to be considered.</p>

10. AUSCULTATION

L'auscultation des glissements de terrain est identique à celle des barrages. Elle consiste à contrôler le comportement d'un glissement au moyen d'appareils de mesure et d'observations directes. Des informations relatives au climat, à la retenue et à la rivière sont également nécessaires. L'auscultation nécessite :

- La mise en place d'un système d'auscultation comprenant des appareils de mesure et des observations directes,
- La collecte et le stockage systématiques des données d'auscultation,
- L'analyse et l'interprétation des données, en temps opportun,
- L'établissement d'un rapport présentant les données et leur interprétation.

L'analyse des données nécessite une connaissance détaillée du versant, des appareils d'auscultation et de leurs fonctions, ainsi qu'une bonne expérience dans le domaine des glissements de terrain en général.

L'auscultation tient une place importante dans les reconnaissances et études, dans le contrôle lors du premier remplissage et en cours d'exploitation normale. Elle permet également d'avertir suffisamment tôt pour déclencher des opérations d'alerte et de secours.

10.1. BIENFAITS DE L'AUSCULTATION

L'auscultation est un puissant outil pour l'investigation et la prévision du comportement des glissements de terrain et est essentielle à leur suivi. Dans le contexte du présent Bulletin, « l'auscultation d'investigation » est l'auscultation destinée à fournir des informations géotechniques, et « l'auscultation de prévision » est l'auscultation destinée à avertir d'un changement de conditions. En général, l'auscultation répond à l'un et à l'autre de ces objectifs.

L'auscultation peut fournir des informations sur la situation, la direction et la vitesse des mouvements, et la relation entre ces mouvements et les conditions climatiques, les séismes, les niveaux de la retenue, les niveaux de la nappe phréatique, ou d'autres paramètres influant sur la stabilité du versant. L'auscultation peut être utilisée pour localiser les zones en mouvement en profondeur et pour détecter la naissance de nouveaux mouvements. Elle peut servir à confirmer ou à réfuter les interprétations géologiques.

Toutes ces informations sont indispensables à une définition acceptable du danger, qui est nécessaire pour une évaluation significative du risque. Elles ne peuvent être recueillies sans participation de l'auscultation.

10.2. AUSCULTATION D'INVESTIGATION

L'auscultation à but d'investigation peut se réduire à une inspection visuelle annuelle, ou s'étendre à un vaste réseau d'appareils avec mesures journalières ; cela dépend du type de phénomène et de l'ampleur du programme d'auscultation. Des

10. MONITORING

Landslide monitoring is similar to the monitoring of dams. Landslide monitoring is the activity of observing the behaviour of a landslide using instruments and direct observation. Related climate, reservoir and river information is also necessary. Monitoring requires :

- A planned system of instruments and direct observations,
- The systematic collection and storage of monitoring data,
- The timely assessment and interpretation of the data,
- The reporting of data and interpretation.

Assessment of the data requires a detailed site specific knowledge of the slope, the instruments and their functions, as well as expertise in landslides in general.

Monitoring is a key part of investigations, reservoir filling and normal operations. It also provides early warning for initiating emergency actions.

10.1. BENEFIT OF MONITORING

Monitoring is a powerful tool for the investigation and prediction of landslide behaviour and is essential for landslide management. Within the context of this Bulletin, “ investigative monitoring ” is monitoring to provide geotechnical information and “ predictive monitoring ” is monitoring to provide a warning of changing conditions. Most monitoring serves both of these purposes to some extent.

Movement monitoring can provide information on the rate, location and direction of movements, and the relationship of these movements to weather, earthquakes, reservoir levels, groundwater levels or other influences on slope stability. Movement monitoring can be used to locate movement zones at depth and to detect the onset of new movements. It can serve to confirm or refute geological interpretations.

All of this information is fundamental to a reasonable definition of the hazard, which is necessary for a meaningful assessment of the risk. It cannot be collected without a commitment to monitoring.

10.2. INVESTIGATIVE MONITORING

Monitoring for investigative purposes can be as little as an annual visual inspection, or as much as daily measurement of a comprehensive instrumentation network, depending on the type of phenomenon and the magnitude of the

mesures topographiques des déplacements en surface, exécutées mensuellement, trimestriellement ou même annuellement, sont parfois suffisantes. Les programmes d'auscultation doivent prévoir des inspections spéciales ou des lectures supplémentaires d'appareils d'auscultation au cours et après des événements critiques.

Sur plusieurs aménagements, l'auscultation d'investigation a été effectuée pendant des décennies ; on peut citer le glissement Branham Ridge dans la retenue créée par le barrage Bennett, en Colombie Britannique (Enegren & Moore, 1992), et l'aménagement Polyphyton en Grèce (Riemer *et al*, 1996). Cette longue période d'auscultation résulte du temps nécessaire pour détecter des mouvements lents ou intermittents, en particulier au moyen de méthodes moins sensibles, telles que des mesures topographiques de surface. L'auscultation d'investigation peut avertir de changements rapides de conditions, mais la faible fréquence des observations rend les applications à but de prévision moins vraisemblables.

Il importe que les données de base soient recueillies avant tous changements apportés aux versants. Sans de telles données, il est impossible de démontrer l'efficacité des travaux de correction ou d'identifier les changements de niveau de la nappe phréatique, ou de type et de vitesse de déformation, résultant du remplissage ou de la vidange de la retenue. Les données de base comprennent également les paramètres climatiques utiles (voir Tableau 1), en particulier la pluviométrie.

L'auscultation d'investigation est utile pour obtenir une meilleure compréhension du versant, et ainsi permettre d'adopter une approche correcte ou de confirmer que l'approche déjà adoptée s'est avérée satisfaisante. Dans ce cas, une auscultation en temps réel n'est généralement pas nécessaire, étant donné qu'une réponse rapide au changement de conditions n'est pas le premier objectif du programme. Les programmes d'auscultation d'investigation seront modifiés dans le temps pour tenir compte d'une meilleure compréhension du comportement du versant, et peuvent être arrêtés lorsque des informations suffisantes sont acquises.

Un dispositif simple d'auscultation supplémentaire sera installé sur un versant en périodes critiques pour enregistrer les principaux paramètres (par exemple, mouvements sur des escarpements). Un faible niveau de précision sera généralement acceptable du fait que la grandeur des variations (par exemple, de mouvement) sera importante. Au contraire, lors des périodes d'activité faible ou nulle, des appareils de mesure de grande précision sont nécessaires pour obtenir des résultats fiables.

Les résultats de l'auscultation d'investigation sont donc utilisés pour :

- Constituer des données de base à partir desquelles seront évalués les changements physiques causés par l'aménagement et les effets des travaux de stabilisation,
- Vérifier ou compléter l'interprétation des conditions géologiques et hydrogéologiques en profondeur (i.e. pour vérifier les modèles), avec révision des modèles pour autant que cela est nécessaire,
- Améliorer la compréhension des mécanismes de rupture,
- Permettre la corrélation des vitesses de mouvement avec d'autres facteurs, tels que les variations de niveau de la retenue, les séismes, les changements de la nappe phréatique, les chutes de pluie, la fonte des neiges, en tenant compte des effets de décalage dans le temps.

monitoring programme. Monthly, quarterly, or even annual surface deformation surveys may be all that are necessary. Monitoring procedures must provide for special inspections or additional readings of instruments during and following critical events.

At several projects, including Branham Ridge Slide into the reservoir behind Bennett Dam in British Columbia (Enegren & Moore, 1992) and the Polyphyton project in Greece (Riemer *et al*, 1996), investigative monitoring has been carried out for decades. This is because this amount of time is required to detect slow or intermittent movements especially by less sensitive methods such as surface surveys. Investigative monitoring can also provide warning of rapidly changing conditions, but the infrequency of the observations makes predictive applications less likely.

It is important that baseline data be collected before any changes are made to the slopes. Without baseline data it is impossible to demonstrate the effectiveness of remedial works or to identify changes in groundwater levels or deformation rates and patterns caused by the lake filling or drawdown. Baseline data also include the relevant climatic parameters (refer Table 1), and in particular rainfall measurements.

Investigative monitoring can be used to obtain a greater understanding of the slope and thus enable a correct approach to be taken or to confirm that the approach already taken has been correct. In this case, there is usually no need for real-time monitoring as rapid response to changing conditions is not the prime objective of the program. Investigative monitoring programs should be modified as time goes on to reflect the increased understanding of the behaviour of the slope and may be stopped when sufficient information has become available.

Additional simple monitoring should be installed on a slope in times of crisis to record the main parameters (e.g. movement across scarps). A low level of accuracy will normally be acceptable as the magnitude of changes (e.g. of movement) will be large. In contrast, during periods of little or no activity, high precision instruments are necessary to obtain reliable data.

Investigative monitoring results are therefore used to :

- Provide baseline data from which to assess physical changes caused by the project and the effect of stabilisation works,
- Check or complement the interpretation of subsurface geological and hydrogeological conditions (i.e. to verify models) and to revise the models insofar as appropriate,
- Improve understanding of failure mechanisms,
- Enable movement rate to be correlated with other factors such as reservoir level fluctuations, earthquakes, groundwater changes, rainfall or snowmelt, taking account of time lag effects.

Au cours des étapes d'*études de faisabilité* et d'*études d'avant-projet sommaire*, l'auscultation contribue à la description du versant et à la connaissance de son comportement actuel. Les données de base recueillies pendant plusieurs années avant les travaux correctifs associés à la mise en eau de la retenue fourniront plus tard des informations vitales pour l'évaluation des effets de ces travaux (voir également le chapitre 5.3.).

Les dispositifs d'auscultation installés au cours des étapes d'*études de faisabilité* et d'*études d'avant-projet sommaire* sont utilisés pour déterminer les conditions de nappe phréatique, et les vitesses, profondeurs et étendue dans l'espace des mouvements. De simples appareils avec mesures manuelles, tels que des tubes piézométriques, des inclinomètres en forages et des réseaux d'auscultation topographique en surface, peuvent être très efficaces. Des appareils plus complexes, tels que des piézomètres dans un forage, avec enregistrement électronique, peuvent fournir de meilleurs relevés des variations que les appareils manuels lus moins fréquemment, mais ils sont plus chers. La priorité au cours de ces étapes est de développer les modèles et la connaissance du comportement du versant afin de savoir si des travaux correctifs sont nécessaires.

Au cours de la phase de *construction*, des appareils de mesure supplémentaires peuvent être installés et relevés en vue d'évaluer l'efficacité des mesures correctives, telles que le drainage.

L'auscultation au cours de la *mise en eau* est essentielle pour confirmer que les réponses dans les domaines de la piézométrie et des déformations sont à l'intérieur des limites prévues et acceptables. Les résultats d'auscultation peuvent indiquer que de nouvelles surfaces de rupture se développent, ou que des anomalies existent dans la nappe phréatique, traduisant que le drainage est inadéquat en certains endroits. Des réponses inattendues peuvent nécessiter des investigations supplémentaires.

En cours d'*exploitation*, une pratique reconnue est de poursuivre l'auscultation pendant la durée de vie de l'aménagement ou jusqu'à ce qu'on démontre que la stabilité requise se maintiendra.

L'auscultation continue à long terme passe généralement du domaine initial de l'investigation au domaine de la prévision avec signalisation des changements. Cette transition est souvent opérée en sélectionnant des appareils-clés d'auscultation pour une utilisation à long terme, les autres appareils d'auscultation étant lus moins fréquemment ou abandonnés.

10.3. AUSCULTATION DE PRÉVISION

Dans un grand nombre de cas, l'auscultation doit être poursuivie pendant toute la durée d'exploitation de l'aménagement. Pour les retenues, cela peut couvrir plusieurs périodes, à moins qu'il soit démontré que les tendances sont à une stabilité ou à une amélioration. Une pratique reconnue est l'introduction de l'auscultation des glissements de terrain dans le programme de contrôle de sécurité établi par le maître d'ouvrage pour le barrage et la retenue.

Les dispositifs d'auscultation de prévision évoluent généralement après les études et reconnaissances d'un versant, l'installation des appareils de mesure à but d'investigation et l'établissement d'un modèle de comportement du versant. Sans

During the *feasibility* and *preliminary design* stages, monitoring is used to help build a picture of the slope and its current behaviour. Baseline data collected for several years prior to remedial works of lake filling later provide vital information for assessing the effects of those activities. (Refer also to Section 5.3).

Instruments installed during the *feasibility* and *preliminary design* stages are used to determine groundwater conditions and the rates, depth and areal extent of movement. Simple manually read instruments, including standpipe piezometers, borehole inclinometers and surface survey networks, can be very effective. More complex instrumentation, such as electronically logged piezometers in a single drillhole, may provide a better record of changes than less frequently read manual instruments, but they are more expensive. The priority during these stages is to develop models and knowledge of slope behaviour that show whether or not remedial works are required.

During *construction*, additional instruments may be installed and monitored in order to evaluate the effectiveness of remedial measures such as drainage.

Monitoring during *filling* is essential to confirm that piezometric and deformation responses are within expected and acceptable limits. Monitoring data may show that new failure surfaces develop, or that complexities in groundwater systems mean that there is inadequate drainage in some locations. Unexpected responses may require further investigations.

Under *operational* conditions, it is recognised practice to continue monitoring for the life of the project or until it has been demonstrated that the required stability will be maintained.

The continued long-term monitoring usually changes from being primarily investigative to being predictive and providing warning of changes. This transition is often initiated by selecting key monitoring instruments for long term use and monitoring other instruments less frequently or abandoning them.

10.3. PREDICTIVE MONITORING

In many cases, monitoring must be carried on for the entire operational life of the project. For reservoir projects, this can span several working lifetimes, unless trends are demonstrably stable or improving. It is recognised practice to include the monitoring of landslides within the owners' safety programme for the dam(s) and reservoir.

Predictive monitoring systems usually evolve after a slope has been investigated, instrumentation has been installed for investigative purposes and a slope behaviour model has been developed. Without this investigation, it is unlikely

ces investigations, il est peu probable qu'un système à but de prévision puisse être conçu pour mesurer de façon satisfaisante les paramètres utiles.

Un système d'auscultation de prévision étant installé, on peut détecter des changements dans le comportement du versant et prendre des dispositions pour limiter les dégâts ou mettre en œuvre des mesures préventives. Les mesures de stabilisation sont aussi contrôlées généralement pour vérifier que leur efficacité se maintient. Pour remplir ces fonctions, un dispositif d'auscultation de versant doit contrôler les paramètres significatifs, être fiable et assurer une fonction continue. En outre, les responsables doivent réagir correctement, et souvent rapidement, aux résultats d'auscultation.

Même avec un tel système en place, des risques résiduels se présenteront. Un de ces risques est celui d'un glissement déclenché par un séisme, qui peut provoquer une accélération soudaine laissant peu ou pas de temps pour prendre des mesures destinées à limiter les dégâts. D'autres situations à risque comprennent des chutes de roche et des glissements dans certains matériaux, tels que des argiles, qui se développent très rapidement et avec peu de signes avertisseurs.

Si la plupart des grands glissements passeront par une période de mouvement croissant avant un mouvement important et rapide, des augmentations rapides de mouvement peuvent également survenir soudainement, comme à Vaiont.

Au cours de cette auscultation à long terme, il importe d'avoir des appareils de mesure appropriés pour contrôler le comportement des versants lors d'événements peu fréquents, par exemple lors de fortes chutes de pluie ou fontes de neige.

10.4. FIABILITÉ DES DONNÉES

10.4.1. Convenance des dispositifs d'auscultation

Un dispositif d'auscultation n'est adéquat que si les paramètres significatifs sont mesurés avec une précision convenable et si une redondance suffisante est prévue. Une redondance est nécessaire car des appareils peuvent conduire à des anomalies dans les mesures, soit du fait d'un dysfonctionnement temporaire, soit du fait d'un changement dans les conditions. Des dysfonctionnements et des anomalies de lectures sont quasi probables pour les dispositifs d'auscultation géotechnique installés dans des milieux éloignés et hostiles.

Les appareils de mesure seront régulièrement contrôlés, immédiatement après leur installation et périodiquement au cours de leur durée d'exploitation, en vue de vérifier s'ils continuent de fonctionner correctement, et de détecter ceux fournissant des résultats erronés. Par exemple, des zones piézométriques mal définies, des piézomètres et drains cisailés ou obstrués, ou des appareils non sensibles peuvent fournir des résultats non fiables ou erronés. Le temps de réponse et les effets d'atténuation des différents types de piézomètre doivent être connus et pris en compte.

Une des formes les plus courantes d'inadéquation d'un dispositif d'auscultation est la mesure de mauvais paramètres. Des inclinomètres peuvent être situés à une profondeur insuffisante, ou des extensomètres non installés dans les zones de mouvement critique. De même, des appareils très espacés (par exemple, des

that a predictive system can be designed to monitor the relevant parameters adequately.

With a predictive monitoring system in place, changes in slope behaviour can be detected and steps can be taken to limit damage or to install preventive measures. Stabilisation measures are also usually monitored to ensure their continued effectiveness. To fulfil these functions, a slope monitoring system must monitor the relevant parameters, must be reliable and must be essentially continuous. In addition, those responsible must react correctly, and often rapidly, to the monitoring results.

Even with such a system in place there will be residual risks. One such residual risk is that of an earthquake-triggered slide which could begin to accelerate suddenly, allowing little or no time to implement measures to limit damage. Other risk situations include rockfalls and slides in some materials, such as quick clays, which develop very quickly and with little warning.

While most large slides will undergo a period of increasing movement prior to any large rapid movement, rapid increases in movement may occur suddenly, as at Vaiont.

During this long-term monitoring, it is important to have suitable instrumentation for assessing the performance of the slopes in infrequent events such as extremely heavy rainfall or high snowmelt.

10.4. RELIABILITY OF DATA

10.4.1. Sufficiency of instrumentation

Instrumentation is sufficient only if the relevant parameters are being monitored with adequate accuracy and if enough redundancy is installed. Redundancy is necessary because instruments can produce anomalous readings either as a result of a temporary malfunction, or because of an actual change in conditions. Malfunctions and anomalous readings can be almost guaranteed for geotechnical instrumentation networks installed in remote, harsh environments.

Instruments should be regularly tested both immediately after installation and periodically during their operational life, to confirm that they are continuing to function correctly and to detect those that may be providing erroneous or misleading data. For example, improperly sealed piezometric zones, sheared or blocked piezometers and drains or non-responsive instruments can provide unreliable or misleading data. The response time and attenuation effects of different piezometer types must be known and taken into account.

One of the more common ways for instrumentation to be insufficient is for the wrong parameters to be measured. Inclinometers might not be deep enough or extensometers might not be installed across the critical movement zones. Similarly, widely-spaced instruments (e.g. piezometers) may provide misleading information

piézomètres) peuvent fournir des informations fallacieuses, étant donné qu'il est nécessaire d'interpoler entre celles-ci pour évaluer les conditions de nappe phréatique. Des appareils installés dans une zone adjacente stable sont également utiles pour déterminer la précision réelle du système de mesures et faire une distinction entre les résultats réels et les dérives ou autres effets.

10.4.2. Fréquence d'auscultation

Les informations fournies par l'auscultation doivent être associées à une compréhension du milieu physique, et la relation entre ce milieu et les appareils de mesure avant une prévision précise est tant soit peu vraisemblable. De grands versants rocheux peuvent changer de comportement en passant d'un mouvement lent ou d'un état d'inactivité à un mouvement rapide en quelques heures, jours ou semaines, suivant la cause du phénomène. La fréquence des mesures sur les appareils-clés d'auscultation doivent être une fraction de ce temps, afin de réduire substantiellement le risque d'un glissement rapide imprévu et de donner suffisamment de temps pour déclencher des plans d'alerte. Dans le cas de zones d'accès difficile, il est nécessaire d'adopter des systèmes d'acquisition automatique de données (SAAD) et la télétransmission des données à un poste central pour évaluation.

La fréquence des lectures piézométriques doit être une fraction de la fréquence de variation de la pression d'eau afin d'obtenir des données significatives. Des mesures très espacées peuvent conduire à des informations très trompeuses. La fréquence doit permettre de suivre au moins les variations saisonnières. Il importe de considérer à la fois la collecte des données relatives à l'événement et la collecte régulière (convenablement espacée dans le temps) des données pour l'analyse statistique.

Dans le cas de l'aménagement hydroélectrique de Clyde, Nouvelle-Zélande, l'auscultation à long terme a pour objectif principal le contrôle de la sécurité d'exploitation de la retenue. Elle est basée sur des appareils de télémessure, d'autres appareils-clés, et des inspections visuelles. Toutes les mesures sont exécutées à des fréquences suffisantes pour permettre un contrôle continu des hypothèses de projet sans relever un nombre superflu d'appareils. La philosophie de base est de détecter des variations dans la vitesse du mouvement ou dans le débit de drainage, suffisamment tôt, en analysant les résultats des télémessures, et d'être capable de confirmer les variations aux endroits critiques au moyen d'appareils de mesure de première qualité ou d'inspections visuelles.

10.4.3. Utilisation de systèmes SAAD

La réussite de l'exploitation et de l'entretien d'un système d'acquisition automatique de données (SAAD) repose sur une équipe d'opérateurs ayant de bonnes connaissances et expériences techniques dans les domaines des appareils de mesure, de l'informatique, des procédures d'exploitation utilisées dans le centre de contrôle, des télécommunications et de l'électronique. Comme précédemment indiqué, l'analyse des données nécessite une bonne connaissance du site et une bonne formation en matière de glissement de terrain. Généralement, peu d'organismes ont ces capacités, et encore moins sont organisés pour ausculter 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

as it is necessary to interpolate between them to assess groundwater conditions. Instrumentation installed in an adjacent stable area is also useful to determine the actual accuracy of the system and to separate real results from drift or other effects.

10.4.2. Monitoring frequency

Monitoring information must be coupled with an understanding of the physical setting and the relationship between this setting and the instrumentation before an accurate prediction is at all likely. Large rock slopes can change their behaviour from one of slow creep or inactivity to rapid movement in a period of only hours, days or weeks depending on the cause. The frequency with which key instruments are monitored must be a fraction of this time to substantially reduce the risk of an unexpected rapid slide and to allow time for initiating emergency plans. For difficult access areas, this requires automatic data acquisition systems (ADAS) and telemetry of data to a central location for assessment.

The frequency of piezometric readings must be a fraction of the water pressure fluctuation frequency for meaningful data to be obtained. Widely spaced readings can create very misleading information. The frequency must be sufficient to monitor at least seasonal variations. It is important to consider the collection of both event related data and the regular collection (evenly spaced in time) of data for statistical evaluation.

For the Clyde Power Project, New Zealand, long-term monitoring is primarily concerned with confirming the operational safety of the reservoir. It is based on telemetered instruments, other key (primary) instruments, and visual inspections. All are monitored at frequencies sufficient to allow on-going monitoring of design assumptions without reading unnecessarily large numbers of instruments. The basic philosophy is to detect changes in movement rate or drainage flow as early as possible using telemetered data, and to be able to confirm changes at critical locations with high quality instruments or by visual inspection.

10.4.3. Using ADAS systems

Successful operation and maintenance of an automatic data acquisition system (ADAS) is dependent on a team of personnel with technical expertise in instrumentation, computer science, control centre operating procedures, telecommunications and electronics. As previously noted, assessment of the data requires both site specific knowledge and landslide expertise. Currently, few organisations have these capabilities, and even fewer are as yet set up to monitor for 24 hours per day, 7 days per week.

La permanence de personnel sur le long terme et l'engagement de moyens financiers pour l'exécution des tâches d'auscultation sont parmi les exigences les plus importantes. Sans ces compétences techniques et ces moyens financiers, les responsables de tels contrôles devront envisager des solutions plus classiques, bien que l'auscultation SAAD puisse s'avérer moins coûteuse sur le long terme.

Afin de tirer les avantages souhaités d'un tel système, le stockage des données doit être bien organisé et donner la possibilité de procéder à une recherche sélective immédiate et à une visualisation.

10.4.4. Fiabilité des systèmes

La fiabilité des systèmes est une nécessité fondamentale pour l'auscultation de prévision. Les appareils de mesure, les systèmes d'acquisition et de communication de données sont tous sujets à des pannes occasionnelles. Le système de communication nécessaire à la prise de mesures pour limiter les dégâts doit être fiable.

La fiabilité doit être vérifiée pour toutes circonstances prévues, et des plans d'intervention en cas d'événements critiques imprévus doivent être établis. Sur un site au Canada (Moore *et al*, 1991), lorsque plusieurs alarmes furent déclenchées au cours d'un entretien de routine, le logiciel de pilotage du système connut une défaillance et ne put être exploité pendant plusieurs heures. Le problème était simplement que le programmeur du système n'avait pas prévu un tel nombre d'alarmes en même temps. Le problème de programme fut facilement corrigé, une fois identifié. Si ce problème n'avait pas été découvert accidentellement, le premier mouvement important de versant aurait conduit à une défaillance identique.

Il faut s'attendre à des surprises identiques sur les systèmes complexes d'auscultation géotechnique. Cela souligne la nécessité d'essais approfondis avant que le système puisse être considéré comme fiable. Même avec des essais appropriés, des dysfonctionnements peuvent se produire.

Pour un système en service, les opérateurs doivent être sensibles au système. Cette sensibilité est facilement acquise tant que le risque est présent à la mémoire, mais une complaisance se développe rapidement. Cela est particulièrement vrai si le système est perçu comme non fiable. Une série de fausses alarmes provoquera rapidement peu d'empressement à prendre des mesures basées sur le système. Pour lutter contre cette complaisance, une formation continue des opérateurs, un débogage du système sans rémission, et son entretien continu sont absolument obligatoires. Des simulations de circonstances critiques, identiques à celles utilisées dans le domaine de la sécurité de barrage, sont également utiles.

10.4.5. Collecte et traitement des données

La collecte et le traitement des données relatives à l'auscultation des glissements de terrain peuvent normalement être effectuées, dans le cas des retenues, en se servant des systèmes établis pour la gestion des données d'auscultation des barrages. Cela peut inclure les Systèmes d'Informations Géographiques.

Les résultats d'auscultation des glissements de terrain doivent être périodiquement analysés et bien documentés. Cela implique un examen technique (voir chapitres 4.3.4. et 11.4).

Among the most important requirements are long-term continuity of personnel and commitment of resources to the monitoring task. Without these skills and commitments, those responsible should consider more traditional solutions, even though ADAS monitoring can be more than an order of magnitude less costly over time.

To obtain the desired benefits from such a system, data storage must be well organised and must provide the capacity for immediate selective retrieval and visualisation.

10.4.4. System reliability

System reliability is a fundamental necessity for predictive monitoring. Instrumentation, data acquisition and communication systems are all subject to occasional failures. The communications system necessary to initiate actions to limit damage must also be reliable.

Reliability has to be checked under all anticipated circumstances, and contingency plans for unanticipated events should be made. At one site in Canada (Moore *et al*, 1991), when multiple alarms were triggered during routine maintenance, the software running the system shut down and could not be operated for several hours. The problem was simply that the software programmer for the system had not anticipated such a large number of alarms at the same time. The program problem was easily corrected once it was identified. Had this problem not been accidentally discovered, the first significant slope movement probably would have resulted in a similar shut down.

Similar surprises should be expected from all complex geotechnical monitoring systems. This underlines the need for comprehensive testing before the system can be considered reliable. Even with proper testing, some malfunctions should be expected.

For a system to work, the operators must be responsive to the system. So must anyone they have to depend on. Responsiveness is readily obtained while the risk is fresh in people's minds, but complacency develops rapidly. This is especially true if the system is perceived to be unreliable. A series of false alarms will quickly develop a reluctance to take any kind of action based on the system. To counter complacency, operator training and retraining, relentless system debugging and persistent maintenance are absolutely mandatory. Emergency simulations similar to those used in dam safety trials are also useful.

10.4.5. Data collection and processing

The collection and processing of landslide monitoring data can normally be carried out within the systems established for managing the dam monitoring data for the reservoir. This may include the use of Geographical Information Systems.

Results of landslide monitoring need to be routinely and periodically evaluated and documented. This may involve technical review (refer Sections 4.3.4. and 11.4).

La collection de rapports sur des glissements de terrain constitue également une importante base de données qui doit être tenue à jour.

Les données présentant des anomalies seront examinées dès qu'elles sont identifiées. Toutes données considérées définitivement comme fausses seront écartées de l'enregistrement, cette annulation étant notée. Des explications seront activement recherchées pour toutes autres données anormales : tout d'abord par le premier observateur, et ensuite par la personne chargée de l'analyse des données. Il est très souhaitable que le premier observateur compare les résultats avec les précédentes données, lors des lectures, de façon qu'une vérification immédiate puisse être effectuée pendant qu'il est encore sur place.

Les appareils de mesure et les systèmes de télémesure et d'acquisition de données, modernes, bien entretenus et débogués, sont devenus très fiables et peuvent couvrir un vaste domaine. Par exemple, les données d'auscultation concernant l'aménagement hydroélectrique de Clyde furent gérées en utilisant un système informatique conçu pour collecter, traiter, stocker et analyser les lectures provenant d'un vaste réseau d'appareils auscultant le barrage et les glissements de terrain. Les données entrant dans les bases de données peuvent être visualisées sur écran avec identification des valeurs anormales ou imprévues, ce qui provoque des alarmes nécessitant des mesures déterminées par la nature de l'alarme.

10.4.6. Choix des critères d'alarme

Le choix des critères d'alarme sera basé sur les conséquences d'une rupture, le temps disponible pour prendre des mesures, les caractéristiques des appareils de mesure, les niveaux historiques de comportement satisfaisant, et la capacité du modèle de versant pour décrire le glissement de terrain. Les paramètres utilisés pour le remplissage initial seront habituellement définis par le projecteur.

Les critères d'alarme seront revus et ajustés, comme il convient, au cours de quelques années d'exploitation de la retenue lorsque les évolutions se sont stabilisées. En vue d'obtenir le maximum d'avantages, l'équipe effectuant ces modifications comprendra au moins un membre de l'équipe de projet, des personnes qualifiées connaissant le comportement de jour en jour du glissement, et éventuellement un tiers indépendant. Par la suite, l'applicabilité des critères d'alarme pourra être vérifiée au cours des évaluations périodiques de sécurité.

Les alarmes peuvent être basées sur des limites, des vitesses ou des tendances prédéterminées, ou des combinaisons de celles-ci. Les niveaux d'alarme peuvent être définis analytiquement ou choisis empiriquement. On peut donner comme exemples de définition analytique de critères d'alarme :

- Des niveaux de nappe phréatique ou des pressions interstitielles approchant de valeurs qui réduisent dangereusement la stabilité du versant,
- Des déplacements dans une rupture par écroulement, qui amènent la force résultante près du bord de la colonne,
- Des déplacements dans une rupture potentielle se présentant « la première fois », qui augmentent la possibilité d'un dépassement de la résistance maximale sur la surface de rupture,
- Des augmentations critiques de charge sur des dispositifs d'ancrage.

The library of reports about the landslides is also an important database that must be maintained and kept up to date.

Anomalous data should be reviewed as soon as noticed. Any data that are conclusively spurious should be removed from the record and this deletion should be recorded. Explanations should be actively sought for any other anomalous data : first by the original observer and then by a reviewer. It is most desirable that the original observer make data comparisons at the time the reading is taken so that a check can be immediately made while still at the site.

Modern, well maintained and debugged instrumentation and data acquisition and telemetry systems have become very reliable and can be very comprehensive. For example, Clyde Power Project monitoring data were managed using a purpose-designed computer system to collect, process, store and analyse readings from the wide range of instruments installed in the dam and landslides. Data entering the databases can be screened with anomalous or unexpected values identified, thus raising alarms that require actions determined by the nature of the alarm.

10.4.6. Selection of alarm criteria

The selection of alarm criteria should be based on the consequences of failure, the time available to take action, the characteristics of the instrumentation, historic levels of satisfactory performance, and the ability of the slope model to describe the landslide. It is expected that the parameters used for the initial filling will be defined by the original designer(s).

The alarm criteria should be reviewed and adjusted, as appropriate, within a few years of filling when trends have stabilised. To obtain the most benefit, the team making these changes should include at least one member of the original design team, senior personnel familiar with the day-to-day behaviour of the slide(s), and possibly a third, independent, party. Subsequently, the appropriateness of the alarm criteria can be reviewed during routine periodic safety evaluations.

Alarms can be based on pre-defined limits, rates or trends, or combinations of these. The alarm levels can be either defined analytically or selected empirically. Examples of analytical definition of alarm criteria are :

- Groundwater levels or pore pressures approaching values which critically reduce the slope stability,
- Displacements in toppling failure which bring the resultant force close to the border of the column,
- Displacements in a potential “ first time ” failure which raise the possibility of exceeding peak strength on the failure surface,
- Critical load increases on anchor systems.

D'autres considérations peuvent intervenir dans le choix des critères d'alarme :

- Des vitesses de déformations rapportées à des enregistrements de base satisfaisants,
- Des déformations mettant en danger des installations existantes ou provoquant un cisaillement des appareils de mesure,
- Des variations dans le débit de drainage et le ruissellement de surface, traduisant une baisse d'efficacité des mesures correctives de drainage,
- Des variations dans les émissions acoustiques, indiquant des changements dans la distribution des contraintes et dans la résistance au cisaillement,
- Des relations empiriques glissement-rupture (Saito, 1980 ; Kawamura, 1985 ; Chen et Wang, 1988),
- Des critères établis empiriquement pour les avalanches,
- Des intensités de chutes de pluie.

Les niveaux d'alarme initiaux seront établis de façon prudente, leur révision devant être effectuée postérieurement.

Other considerations can be used to select alarm criteria. These include :

- Rates of deformation related to satisfactory baseline records,
- Deformation endangering existing installations or shearing instrumentation,
- Changes in drainage flow and surface runoff indicating declining efficiency of remedial drainage measures,
- Changes in acoustic emissions indicating changes in stress distribution and shear resistance,
- Empirical creep-rupture life relations (Saito, 1980 ; Kawamura, 1985 ; Chen & Wang, 1988),
- Empirically developed criteria for avalanches,
- Rainfall intensity.

Initial alarm levels should be set conservatively, recognising that they will subsequently have to be revised.

11. SURVEILLANCE REQUISE EN COURS D'EXPLOITATION

11.1. GÉNÉRALITÉS

La stabilité des versants d'une retenue doit être surveillée pendant la période d'exploitation de l'aménagement. Il arrive parfois que les niveaux de retenue et les vitesses de variation de niveau doivent subir des restrictions. Toutes restrictions seront incluses dans les consignes d'exploitation de la retenue.

L'exploitation et l'entretien des systèmes de surveillance et/ou la surveillance et la maintenance des mesures correctives peuvent être des opérations coûteuses et difficiles. En raison des grands risques et incertitudes souvent associés aux problèmes géotechniques concernant des glissements importants, une pratique reconnue est de prévoir un examen technique continu du comportement des versants de retenues.

Jusqu'à ce que le versant submergé ait subi des conditions de charge exceptionnelles ou anormales (par exemple, séisme ou chute de pluie exceptionnellement forte), il peut ne pas avoir encore atteint sa stabilité.

Le comportement d'un versant de retenue peut changer dans le temps par suite d'influences externes, telles que l'utilisation des sols, le climat ou les séismes. Les conséquences de l'instabilité d'un versant peuvent aussi changer par suite de modifications dans l'utilisation de la retenue ou de ses abords.

En principe, tous ces facteurs d'influence seront considérés comme changeants et importants, jusqu'à preuve du contraire.

Il est essentiel que toute auscultation d'un glissement de terrain concernant une retenue soit exécutée dans le contexte du programme de contrôle de sécurité établi par le maître d'ouvrage pour le barrage et la retenue.

11.2. EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES SYSTÈMES DE SURVEILLANCE

11.2.1. Exploitation

L'exploitation des systèmes de surveillance après la construction et la mise en service nécessite un engagement à long terme de la part du maître d'ouvrage. Cela peut être difficile à remplir pour un certain nombre de raisons :

- Il y a généralement un changement de personnel à ce stade des activités. Les nouveaux arrivants doivent être formés afin qu'ils se rendent compte des risques qui ont été atténués et de l'importance du système de surveillance. Il est très difficile de transmettre les préoccupations qu'ont connues ceux engagés dans le projet et la construction.

11. OPERATIONAL REQUIREMENTS

11.1. GENERAL

The stability of marginal slopes has to be taken into account during the ongoing operation of a reservoir. Sometimes this means that reservoir levels and rates of reservoir level change must be restricted. Any such restrictions should be included in local reservoir operating orders.

Operation and maintenance of surveillance systems and/or remedial measures can be an expensive and difficult operation. Because of the great risk and uncertainty that is often associated with geotechnical problems of major landslides, it is recognised practice to provide for on-going technical review of the performance of the reservoir slopes.

Until the inundated slope has been subjected to extreme or abnormal loading conditions (e.g. earthquake or unusually high rainfall), it may not have reached its least stable condition.

Reservoir slope behaviour can change over a period of time as a result of external influences such as land use, climate or earthquakes. The consequences of slope instability may also change as result of changes in use of the reservoir or its surroundings.

In principle, all such influencing factors should be considered changeable and significant, until proven otherwise.

It is essential that any reservoir landslide monitoring be carried out within the context of the owners' safety programme for the dam(s) and reservoir.

11.2. OPERATION AND MAINTENANCE OF SURVEILLANCE SYSTEMS

11.2.1. Operation

Operation of surveillance systems following construction and commissioning requires a long-term commitment from the owner. This may be difficult to fulfil for a number of reasons.

- There is usually a change in personnel at this stage in the project. The incoming operators must be trained to understand the risks that have been mitigated, and to understand the importance of the surveillance system. It is very difficult to pass on the concerns that are felt by those involved with the design and construction.

- Les nouveaux exploitants doivent également comprendre le fonctionnement du système et la signification des résultats. Étant donné qu'ils ne sont vraisemblablement pas des spécialistes en matière de stabilité de versant, leur intérêt et leurs connaissances doivent être développés.
- La participation de spécialistes est essentielle. De préférence, un tel concours sera fourni par du personnel contractant provenant de l'équipe de projet, plutôt que d'organismes susceptibles parfois de ne pas avoir les compétences ou connaissances nécessaires.
- La durée de la phase d'exploitation est beaucoup plus longue que celles des phases précédentes. Les changements de personnel seront prévus à l'avance. Lors des changements de personnel, les connaissances et les préoccupations concernant le système peuvent être sévèrement détériorées, à moins que des mesures délibérées n'aient été prises pour les transférer.
- Une résolution de compter sur la surveillance pour atténuer les risques résultant de glissements de terrain fait supposer une faible probabilité de développement d'un problème sérieux. De fausses alarmes, des pannes et une énorme quantité de données répétitives sont beaucoup plus vraisemblables. Dans ces conditions, une complaisance tend à se développer et l'intérêt diminue.
- Un effort de gestion concerté est nécessaire pour assurer que le système de surveillance sera maintenu en bon état de fonctionnement, et que l'on réagira à tous les résultats en temps opportun et de manière appropriée.

L'exploitation d'un système de surveillance nécessite que les exploitants et leurs conseillers aient confiance dans le système. Comme indiqué dans le chapitre 10.4.4., la fiabilité du système est une nécessité fondamentale.

11.2.2. Entretien

Les appareils de mesure peuvent avoir une longue durée de vie, mais un entretien du système sera inévitablement nécessaire. Par exemple, des stations d'auscultation topographique situées sur des glissements de terrain en activité peuvent devenir instables localement et indiquer ainsi des mouvements erronés. Des appareils situés en profondeur dans des forages peuvent être sujets à des cisaillements ou à des blocages.

L'entretien continu et le remplacement d'appareils seront prévus à l'avance et inclus dans des budgets pouvant être beaucoup plus élevés que celui correspondant à l'installation initiale. Par exemple, au cours de l'année 1997, l'ensemble du système SAAD installé par BC Hydro dans la vallée de la Rivière Columbia fut rénové pour un coût dépassant celui de l'installation initiale, réalisée moins de 10 ans plus tôt.

Les systèmes de logiciels et les bases de données nécessitent eux-mêmes une rénovation périodique, ce qui peut entraîner des tâches et des dépenses importantes.

11.3. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE DES MESURES CORRECTIVES

Des procédures doivent être en place pour que les galeries, drains, butées, protection de versant, tirants d'ancrage, appareils de mesure et routes d'accès, c'est-

- The new operators must also understand how the system works and what the results mean. Since they are unlikely to be slope stability specialists, their interest and knowledge has to be developed.
- Access to specialist support is essential. Preferably such support will be obtained by contracting personnel from the original design team, rather than from organisations that may or may not retain the skills or knowledge.
- The duration of the operations phase is much longer than the earlier stages. Personnel changes should be anticipated. During personnel changes, knowledge and concern regarding the system can be severely diminished unless deliberate actions are taken to transfer them.
- A decision to rely on surveillance to mitigate risk from landslides implies little expectation of a serious problem developing. False alarms, breakdowns and vast quantities of repetitive data are far more likely. Under these circumstances, complacency tends to develop and interest declines.
- A concerted management effort is required to ensure that the surveillance system will be maintained in good working order, and that all results will be responded to in a timely and appropriate manner.

For a surveillance system to work, the operators and their advisers must trust the system. As discussed in Section 10.4.4, system reliability is a fundamental necessity.

11.2.2. Maintenance

Instrumentation can be very long lived, but some maintenance of the system will inevitably be required. For example, survey monuments located on active landslides may become locally unstable and thus indicate anomalous movements. Downhole instruments may shear or block.

Continued maintenance and replacement of instruments should be anticipated and included in budgets which may go far beyond the initial installation. For example, during 1997 the entire BC Hydro ADAS system in the Columbia River valley was upgraded at a cost which exceeded that of the initial installation, less than 10 years earlier.

Computer software systems and the databases themselves require upgrading periodically, and this can involve significant effort and expenditure.

11.3. OPERATION AND MAINTENANCE OF REMEDIAL MEASURES

Procedures must be in place to ensure that all tunnels, drains, buttresses, slope protection, anchors, instrumentation and access routes for reservoir landslide

à-dire l'ensemble des mesures destinées à remédier aux glissements de versants de retenues, soient régulièrement inspectés, vérifiés au point de vue de leur état opérationnel, et entretenus ou remplacés si nécessaire. Cela est essentiel pour assurer que ces ouvrages ou appareils continuent à remplir les fonctions qui leur sont assignées. Un manque de vérification peut conduire à une détérioration progressive des mesures correctives ou des appareils d'auscultation, et donc à une impossibilité de déceler une détérioration des conditions de stabilité ou une évolution des conditions (par exemple, niveaux élevés de nappe phréatique) pouvant entraîner une telle détérioration.

Parmi les points particuliers à prendre en considération, on peut citer :

- Les drains de surface sur des glissements en activité nécessitent une inspection et un entretien (par exemple, réparation des fissures dans les drains) pour éviter que ces drains ne laissent écouler de l'eau dans des fissures de traction en cours de développement ou sur des parties critiques de la masse en glissement, de tels écoulements risquant d'accroître le mouvement,
- Les forages de drainage peuvent être sujets à des obstructions ou à des détériorations dues aux mouvements du versant; des sondages ou des inspections par introduction d'une caméra dans les trous seront effectués régulièrement, et les trous seront curés ou remplacés si les niveaux des piézomètres montent vers des valeurs critiques,
- Les tirants précontraints peuvent subir un fluage ou une corrosion, nécessitant leur remplacement.

11.4. EXAMENS TECHNIQUES

La nature incertaine et souvent inhabituelle des problèmes d'instabilité de versant de retenue, associée à des conséquences potentielles graves, nécessite très souvent un examen technique approfondi, comme signalé au chapitre 4.3.4.

Au cours de la phase d'exploitation d'une retenue, subsiste un besoin continu d'examiner le comportement de ses versants dans les zones où des problèmes ont été identifiés lors du projet. Cela est spécialement nécessaire lorsqu'on a fait confiance aux systèmes d'auscultation. Seule dans de rares cas où ont été réalisés de vastes travaux de correction ou d'installation de systèmes d'auscultation, une expertise permanente in situ peut se justifier sur le long terme. Dans la plupart des cas, on s'appuiera sur des examens périodiques. S'il y a un manque de personnel expérimenté dans une organisation, l'équipe chargée de l'examen technique peut assurer une continuité primordiale au niveau des connaissances.

L'aménagement de la retenue de Revelstoke dans la vallée de la rivière Columbia, au Canada, nécessita la stabilisation d'un grand glissement et l'auscultation de plusieurs autres. En raison de ces travaux, un ingénieur géotechnicien, ayant une grande expérience dans les domaines des glissements et des mesures d'auscultation, réside sur le site et supervise une équipe de techniciens en mesures d'auscultation. Les examens des résultats d'auscultation sont effectués mensuellement par des spécialistes en matière de stabilité de versant, une inspection des versants étant faite deux fois par an. Tous les 6 ans, une inspection et un examen

remedial measures are regularly inspected, checked for operational functionality (if appropriate) and maintained or replaced as required. This is necessary to ensure that these structures or instruments are continuing to perform the functions expected of them. Failure to undertake checks may lead to progressive deterioration of the remedial measures or instruments, and consequently to a failure to recognise a deteriorating stability condition or development of conditions (e.g. high groundwater levels) that could lead to such deterioration.

Specific issues that must be considered include :

- Surface drains on active landslides require inspection and maintenance, such as repairing cracks in drains, to ensure that drains do not deliver water into developing tension cracks or onto critical parts of the slide mass, as this can add to the risk of increased movement,
- Drainholes may be susceptible to blockage or damage due to slope movements, and regular probing or inspection with a borehole camera should be carried out and holes flushed or replaced if piezometers are rising to critical levels,
- Prestressed anchors can creep or corrode and may need replacement.

11.4. TECHNICAL REVIEWS

The uncertain and often unusual nature of reservoir shoreline stability problems, combined with the extreme potential consequences, very often necessitates thorough technical review as discussed in Section 4.3.4.

During the operational stage of a reservoir, there remains an ongoing need for review of the performance of reservoir slopes where problems were identified in design. This is especially necessary where reliance has been placed on instrumentation systems. Only in rare cases where there have been extensive remedial works or monitoring systems constructed can permanent on site expertise be justified for the long-term. For most cases, periodic reviews must be relied upon. In cases where there is a loss of experienced personnel within an organisation, the reviewers may provide important continuity of knowledge.

Development of the Revelstoke Reservoir in the Columbia River valley in Canada involved stabilisation of one large slide and instrumentation of several others. As a result of the scope of this work, a geotechnical engineer with experience in slides and instrumentation is resident at the project and supervises a staff of instrumentation technicians. Reviews of the instrumentation results are carried out by slope stability specialists monthly, and they inspect the slopes twice a year. Once every 6 years, a comprehensive inspection and review of the reservoir slopes is carried out as part of the regular dam safety program. At this time, the adequacy of

complets et détaillés des versants de la retenue sont effectués dans le cadre du programme régulier de contrôle de sécurité du barrage. À cette occasion, l'adéquation de l'auscultation et des travaux de correction est évaluée par rapport aux objectifs initiaux et aux normes modernes (Enegren & Imrie, 1996). Des procédures identiques sont appliquées sur l'aménagement de Clyde, en Nouvelle-Zélande (Gillon *et al*, 1997).

11.5. PLANS D'ALERTE

La préparation de plans d'alerte nécessitée par des problèmes d'instabilité de versants de retenues sera effectuée en même temps que celle concernant d'autres problèmes de sécurité de barrages et retenues. La préparation de plans d'alerte dans le cas d'instabilités de versants de retenues peut être plus exigeante compte tenu de l'étendue possible des dégâts, et nécessiter la participation de divers spécialistes. Les dégâts résultant d'un glissement de versant de retenue peuvent s'étendre à l'amont jusqu'à la tête de la retenue et à l'aval au-delà du barrage. Dans plusieurs cas (par exemple, Vaiont, Val Pola), de telles extensions ont été tragiquement sous-estimées. La possibilité de création de barrages par des glissements de terrain, et de ruptures de barrages résultant de déversements, doit être prise en considération.

Les procédures d'alerte seront mises au point pour des situations prévues d'avance. Elles sont obligatoires dans certains pays et peuvent nécessiter la consultation du public. Les exploitants de retenues auront pleines responsabilités et autorité pour agir en accord avec leur jugement dans le cadre de ces procédures, lorsque des situations se développent. Tous les exploitants seront des personnes expérimentées, responsables, ayant de bonnes connaissances en matière de stabilité de versant, et étant familières avec les circonstances particulières. Une action raisonnablement prudente est une réussite. Encourir un risque ne l'est pas.

Les problèmes particuliers à prendre en compte lors de l'établissement d'un plan d'alerte concernant une rupture de versant de retenue comprennent :

- Une submersion ou un glissement d'un barrage de col peut entraîner une lâchure d'eau de la retenue ou une onde de crue dans une vallée adjacente, ce qui ne serait pas à considérer si l'évacuation se faisait seulement à travers les ouvrages hydrauliques,
- La courte durée au cours de laquelle un glissement peut se développer,
- La vitesse de translation de l'onde engendrée par un glissement,
- L'incertitude de prévision du comportement de versants naturels, comparativement à des ouvrages construits, tels que des barrages.

L'éloignement ou l'accessibilité de la zone de glissement est souvent un facteur supplémentaire à considérer.

L'incertitude de la prévision du comportement de versants naturels peut conduire à de fausses alarmes ou à une inaction malheureuse. Du fait de cette incertitude, il est souhaitable de disposer de spécialistes en matière de stabilité de versant et d'onde de translation générée par un glissement, en vue d'évaluer la situation. Cependant, cela est rarement possible pour un problème évoluant

the monitoring and remedial works is measured against the original intent and against modern standards (Enegren & Imrie, 1996). Similar procedures are in place at Clyde, New Zealand (Gillon *et al*, 1997).

11.5. EMERGENCY PREPAREDNESS

Preparation for emergencies resulting from reservoir shoreline instability should be made along with preparations for other dam and reservoir safety issues. Emergency preparation for reservoir slope instabilities can be more demanding depending on the possible extent of the damage, and it may require inputs from landslide and other specialists. The damage caused by reservoir shoreline slides can propagate upstream to the head of the reservoir and downstream beyond the dam. In several cases (e.g. Vaiont, Val Pola) the extent was tragically underestimated. The possibility of landslide dams and dam break from overtopping may need to be considered.

Emergency procedures should be developed for anticipated occurrences. These are obligatory in some countries and may require public consultation. Reservoir operators should be given full responsibility and authority to act in accordance with their judgement in terms of these procedures as situations develop. All operators should be proven, responsible individuals who have a background and training in slope stability and are familiar with the particular circumstances. An appropriately conservative action is a success. Taking a chance is not.

Special problems to be considered in emergency planning for a reservoir slope failure include :

- Overtopping or sliding of saddle dams can release reservoir water or waves into adjacent valleys that would not have to be considered if release occurred only through the hydraulic structures,
- The short time in which a slide can develop,
- The speed with which a slide generated wave can travel,
- The uncertainty in predicting the behaviour of natural slopes, compared to constructed facilities such as dams.

The remoteness or accessibility of the slide area is often an additional factor to consider.

The uncertainty of predicting the behaviour of natural slopes can lead to false alarms or to inappropriate inaction. Because of this uncertainty, it is advisable to have specialists in slope stability and slide generated waves available to assess the situation. However, this is seldom possible in a rapidly developing problem, so the operators of the surveillance system must be well briefed and emergency operating

rapidement ; aussi les exploitants de systèmes de surveillance doivent-ils être bien organisés, et les ordres de déclenchement d'alerte bien rédigés et facilement applicables. Dans certains cas, on a renoncé à déclencher l'alerte au moyen d'appareils automatiques (Comité Français des Grands Barrages, 1973) ; dans d'autres cas, on a recours à des signaux automatiques d'alerte (Schwab & Pircher, 1982).

Les appareils de mesure, les systèmes de télémessure et d'acquisition de données, modernes, bien entretenus et débogués, sont devenus très fiables et peuvent constituer des systèmes très complets. Il est vraisemblable que davantage de systèmes déclencheront automatiquement des procédures d'alerte dans le futur.

Comme dans le cas d'autres plans d'alerte relatifs à la sécurité de barrages, la signification des observations doit être considérée au préalable et la réponse appropriée doit être prédéterminée. Les impacts possibles doivent être connus et des essais périodiques sur les systèmes de communication effectués si l'on veut qu'ils aient une bonne chance d'être efficaces lors d'un événement réel.

orders must be clearly written and readily available. In some cases it has been considered inadvisable to begin emergency procedures automatically on the basis of slide instrumentation (Comité Français des Grands Barrages, 1973); in other cases emergencies are automatically invoked (Schwab & Pircher, 1982).

Modern, well maintained and debugged instrumentation and data acquisition and telemetry systems have become very reliable and can be most comprehensive. It is expected that more systems will automatically initiate emergency procedures in the future.

As with other dam safety emergency preparedness programs, the significance of observations must be considered beforehand and the proper response must be predetermined. Possible impacts must be known and periodic tests of communications carried out if there is to be a good chance of being effective during a real event.

12. REFERENCES

- ANCOLD (1994). Guidelines on risk assessment. ANCOLD, Sydney.
- ANCOLD (1996). Commentary on ANCOLD Guidelines on Risk Assessment.
- BAUMER, A. (1988). Three rock slides in the southern Swiss Alps. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, p. 1307-1311.
- BC HYDRO (1993). Interim Guidelines for consequence-based dam safety evaluations and improvements. BC Hydro Hydroelectric Division, Vancouver, Report No. H2528.
- BELLONI, L.G.; STEFANI, R. (1987). The Vajont Slide: Instrumentation – past experience and the modern approach. *Engineering Geology 24 – Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 445-474.
- BERTACCHI, P.; FANELLI, M.; MAIONE, U. (1988). An overall approach to the emergency hydraulic problems from the natural dam and lake formed by the Val Pola Rockslide. *Proceedings 16th ICOLD Congress, San Francisco, C.32, p. 1439-1456*.
- BJERRUM, L.; JØRSTAD, F. (1968). Stability of rock slopes in Norway. *Norwegian Geotechnical Institute Publication*, 79 : p. 1-11.
- BROILI, L. (1967). New knowledge on the geomorphology of the Vaiont slide slip surfaces. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 5 : p. 38-88.
- BROMHEAD, E.N. (1992). *The Stability of Slopes*, 2nd ed. 411 p. Surrey University Press.
- BROMHEAD, E.N.; COPPOLA, L.; RENDELL, H.M. (1996). Valley-blocking landslide dams in the Eastern Italian Alps. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 655-660.
- BROWN, R.; GILLON, M.; DEERE, D. (1993). Landslide stabilisation at the Clyde Power Project. *ASCE Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Raleigh, North Carolina*, p. 299-319.
- BUJAK, M.; GLAB, W.; MORCZEWSKI, K.; WOLSKI, W. (1967). Preventive measures against the rock slide at the Tresna dam site. *Proceedings 9th ICOLD Congress, Q. 32, p. 1027-1036*.
- CABRERA, J.G. (1992). Investigation of a landslide on a crucial reservoir rim saddle. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1235-1239.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (1997). Risk Management : Guideline for Decision Makers. Canadian Standards Association, Toronto, Ontario CAN/CSA-Q850-97.
- CATER, D.; QUELLET., PAY, P. (1981). *Fracture of solid ice cover by wind induced or ship generated waves, Proceedings 6th POAC – Conference, Quebec*, 2, p. 843-856.

- CHAUDHRY, M. H. ; MERCER, A. G. ; CASS, D. (1983). Modelling of slide-generated waves in a reservoir. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 109 (11), p. 1505-1520.
- CHEN, M. D. ; WANG, L. S. (1988). A prediction method by grey system for slope deformation and failure. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, p. 531-536.
- CHINESE NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (1987). *Large Dams in China – History, Achievement, Prospect*.
- COMITÉ FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES (1973). Mesures prises en France pour faciliter la protection des populations à l'aval des barrages. *Proceedings 11th ICOLD Congress Q. 40*, p. 661-681.
- COMITÉ FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES (1982). Études et travaux réalisés en France en raison de l'instabilité de versants de retenue. *Proceedings 14th ICOLD Congress Q. 54*, p. 563-589.
- COROMINAS, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, p. 260-271.
- CRUDEN, D.M. ; FELL, R. (1997). Editors, *Proceedings of International Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, USA. Balkema.
- CRUDEN, D.M. ; VARNES, D.J. (1996). Landslide types and processes. In *Landslides : Investigation and mitigation*. Eds A.K.Turner & R.L. Schuster. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy of Sciences, Washington DC, p. 36-75.
- DALYA, S.F. (1993). *Wave propagation on ice-covered channels*, Journal of Hydraulic Engineer, vol. 119, No. 8, p. 895-910.
- DEERE, D.U. ; PEREZ, J-Y. (1985). Remedial measures for large slide movements. *Proceedings of PRC-US-Japan Trilateral Symposium/Workshop on Engineering for Multiple Natural Hazard Mitigation, Beijing*. pL-7-1 to L-7-15.
- D'ERCOLE, R (1996). Les risques naturels et leur gestion en Équateur. *Bulletin Institut Français d'Études Andines* 25 (3).
- DU, Y. ; WANG, S. ; DING, E. (1996). Some landslides triggered typically by impounding of water reservoir in China. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1455-1461.
- DUFFAUT, P. (1987). Séisme et glissements de terrain au Mont Ontake (Japon). *Ann. ITBTP* 457 fév., p. 47-69.
- DUNCAN, J.M. ; WRIGHT, S.G. ; WONG, K.S. (1990). Slope stability during rapid drawdown. *Proceedings H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Berkeley, California.
- DUNNICLIFF, J. (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Wiley, New York, p. 577.
- DUNNICLIFF, J. (1992). Monitoring and instrumentation of landslides. Keynote Paper. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1881-1895.

- DUPREE, H.K. ; TAUCHER, G.J. ; VOIGHT, B. (1979). Bighorn reservoir slides, Montana, USA. *Vol. 2*, p. 247-268 in Voight, B (ed), *Rockslides and Avalanches*. Elsevier, Amsterdam.
- ENEGREN, E.G. ; MOORE, D.P. (1992). Branham Ridge Slide – twenty two years of slope monitoring. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1129-1134.
- ENEGREN, E.G. ; IMRIE, A.S. (1996). Ongoing requirements for monitoring and maintaining a large remediated rockslide. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1677-1682.
- ESPINOSA, L. ; BERNAL, C. (1982). Rock slope instability of canyon walls at Chicoasen damsite. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Q. 53*, p. 425-447.
- EUROCODE 7. GEOTECHNICAL DESIGN (1994). CEN ENV 1997-1 : 1994.
- FINLAY, P.J. ; FELL, R. (1997). Landslides Risk : perception and acceptance. *Canadian Geotechnical Journal 34*, p. 169-188.
- FELL, R. (1994). Stabilisation of soil and rock slopes, *Proceedings. East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, 1 : 7-74*.
- FOSTER, P.F. ; RIDDOLLS, B.W. ; MACFARLANE, D.F. (1996). Response of Clyde Slide, New Zealand, to toe inundation. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 727-731.
- FUNK, M. ; MULLER D. (1990). Wave Induced by Calving of Unteraarglacier, *Proceedings IAHR Ice Symposium, Espoo, Finland*, p. 372-385.
- GALSTER, R.W. (1992). Landslides near abutments of three dams in the Pacific Northwest, USA. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1241-1248.
- GAVARD, M. ; HUSER, R. ; KUNZI, B. ; RIEMER, W. (1997). Stability of the Karakaya reservoir banks. *Proceedings 19th ICOLD Congress, Florence, Q. 74, R. 55*, p. 875-894.
- GIANI, G. P. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*, Balkema, p. 361.
- GILLON, M.D. ; ANDERSON, C.K. ; HALLIDAY, G.S. ; WATTS, C.R. (1992). Jackson Creek landslide stabilisation, New Zealand. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 707-713.
- GILLON, M.D. ; FOSTER, P.F. ; PROFFITT, G.T. ; SMITS, A.P. (1992). Monitoring of the Cromwell Gorge landslides. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1135-1140.
- GILLON, M.D. ; GRAHAM, C.J. ; GROCCOTT, G.G. (1992). Low level drainage works at Brewery Creek Slide. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 715-720.
- GILLON, M.D. ; HANCOX, G.T. (1992). Cromwell Gorge landslides – a general overview. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 83-102.

- GILLON, M.D.; MACFARLANE, D.F.; FOSTER, P.F. (1997). Filling the landslide-affected Clyde reservoir, New Zealand. *Proceedings 19th ICOLD Congress, Florence, Q. 74*, p. 163-182.
- GILLON, M.D.; SAUL, G.J. (1996). Stabilisation of Cairnmuir landslide. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1693-1698.
- HANNA, T.H. (1985). Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. *Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, F.R. Germany*.
- HANSEN, D.C.; MORGAN, R.L. (1986). Control of Thistle Lake, Utah. In *Landslide dams : processes, risk and mitigation* (ed. R.L. Schuster). *ASCE geotechnical Special Publication 3*, p. 84-96.
- HADLEY, J.B. (1978). Madison Canyon Rockslide, Montana. USA. *Rockslides and Avalanches 1, Natural Phenomena. Developments in Geotechnical Engineering Vol. 14A, Ed Barry Voight*.
- HARRISON, A. (1974). Madison Canyon slide mass modification by the U.S. Army Corps of Engineers. In Voight, B. (ed) *Rock Mechanics – the American Northwest. Third International Congress on Rock Mechanics*, p. 138-143.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. (1998). *Societal Risk*. Report by D. J. Bull and P.J. Floyd, HSE, UK.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. (1999). *Reducing Risks, Protecting People*. HSE. Report, UK.
- HENDRON, A.J.; PATTON, F.D. (1985). The Vaiont Slide, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. *US Army Corps of Engineers, Technical Report GL85-5, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Volumes I and II*.
- HENDRON, A.J.; PATTON, F.D. (1986). A geotechnical analysis of the behaviour of the Vaiont slide. *Civil Engineering Practice 1*, p. 65-130.
- HENDRON, A.J.; PATTON, F.D. (1987). The Vaiont Slide – a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. *Engineering Geology 24 – Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 475-491.
- HOEK, E. (1991). When is a design in rock engineering acceptable? Müller Lecture, *Proceedings 7th International Congress Rock Mechanics, Aachen*.
- HOEK, E.; BRAY, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd Edition). The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOEK, E.; IMRIE, A.S. (1995). Guidelines to establish project consulting boards. *International Water Power & Dam Construction 49*, August, p. 33-34.
- HOLTZ, R.D.; SCHUSTER, R.L. (1996). Stabilisation of soil slopes. Ch. 17 in *Landslides : investigation and mitigation* TRB Special Report 247. Eds A.K. Turner & R.L. Schuster. National Academy Press, Washington DC.
- HORNINGER, G.; KROPATSCHEK, H. (1967). The rock slides downstream from the Gmünd dam (Austria) and the measures to safeguard the dam. *Proceedings 9th ICOLD Congress, Q.34*, p. 657-669.

- HUBER, A. (1982). Impulse waves in Swiss lakes as a result of rock avalanches and bank slides. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Q. 54*, p. 455-476.
- HUBER, A.; HAGER, W. H. (1997). Forecasting impulse waves in reservoirs. *Proceedings 19th ICOLD Congress, Florence, C. 31*, p. 993-1005.
- HUBER, A. (1996). Impact of the Kanzertal Avalanches into the Streimbach storage. Interprevent International Congress Garmisch Germany. Proceedings Vol. 2, p. 81-90.
- HUNGR, O.; EVANS, S.G. (1996). Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 233-238.
- HUNT, B. (1988). Water waves generated by distant landslides. *Journal of Hydraulic Research 26 (3)*, p. 307-322.
- HUTCHINSON, J.N. (1977). Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement. *Bulletin International Association Engineering Geology 16*, p. 131-155.
- HUTCHINSON, J.N. (1984). An influence line approach to the stabilisation of slopes by cuts and fills. *Canadian Geotechnical Journal 23*, p. 115-126.
- HUTCHINSON, J.N. (1986). Further observations on Slide No.5, Tablachaca reservoir, Rio Mantaro, Peru. *Proceedings Meeting on the 1963 Vaiont Landslide, Ferrara*, p. 53-65.
- IMRIE, A.S.; MOORE, D.P. (1997). BC Hydro's approach to evaluating reservoir slope stability from a risk perspective. *Proceedings /International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu USA, Balkema*.
- JAEGER, J.C. (1972). *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge.
- JAEGGI, N. R.; BEZZOLA, G. R.; HERZOG, B. (1994). Hydraulic implications of the Randa rockfalls in 1991. IAHR Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements, Trento, Italy. P. B3.1-13.
- JAPANESE INSTITUTE OF CONSTRUCTION ENGINEERING (1995). Landslide investigation and protective measures for reservoir embankments. Sankai-do, p. 73.
- JING DELIAN, WANG GENGFU (1988). The Tangyanguang landslide of Zaxi reservoir. *Typical Slopes in China*, Science Publication House, China (in Chinese). p. 301-307.
- JONES, F.O.; EMBODY, D.R.; PETERSON, W.L. (1961). Landslides along the Columbia River Valley, Northeastern Washington. *US Geological Survey Professional Paper 367*, p. 98.
- JØRSTAD, F. (1968). Waves generated by landslides in Norwegian fjords and lakes. *Norwegian Geotechnical Institute Publication 79*, p. 12-32.
- KANAMURA, K. (1985). Methodology for landslide prediction. *Proceeding 11th ICSMFE*. San Francisco, p. 1155-1158.
- KEEFER, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America, Bulletin 95*, p. 406-421.

- KENNEY, T.C. (1967). Stability of the Vaiont valley slope. *Rock Mechanics and Engineering Geology* 5, p. 10-16.
- KIERSCH, G. A. (1988). Vaiont reservoir disaster. *Advanced Dam Engineering for Design Construction and Rehabilitation*. Ed. Robert B Jansen. Van Nostrand Reinhold, New York.
- KIERSCH, G.A. (1964). Vaiont Reservoir disaster. Geologic causes of tremendous landslide accompanied by destructive flood wave. *Civil Engineering* 34 (3).
- LANE, K.S. (1967). Stability of reservoir slopes. *Proceedings 8th Symposium on Rock Mechanics*. p. 321-336.
- LANE, R.G.T. (1970). Major problems in the operation and maintenance of dams and reservoirs. *Proceedings 10th ICOLD Congress, Q.* 38, p. 329-347.
- LAUFFER, H.; NEUHAUSER, E.; SCHROBER, W. (1967). Uplift responsible for slope movements during the filling of Gepatsch Reservoir. *Proceedings 9th ICOLD Congress, Istanbul. Q. 32, R. 31*, p. 669-690.
- LIU GUANGRUN (1988). Environmental geological investigation of Xintan landslide. *Environmental Geology & Water Science* 12, p. 11-13.
- LOPEZ MARINAS, J.M.; GAZTANAGA, J.M.; CAJETE, J. (1997). Landslides in the Cortes reservoir (River Jucar, Valencia, Spain) during initial filling. *Proceedings 19th ICOLD Congress, Florence. Q. 74, R. 33*, p. 537-550.
- MACFARLANE, D.F.; GILLON, M.D. (1996). The performance of landslide stabilisation measures, Clyde Power Project, New Zealand. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1747-1757.
- MACFARLANE, D.F.; JENKS, D.G. (1996). Stabilisation and performance of No. 5 Creek Slide, Clyde Power Project, New Zealand. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1739-1746.
- MACFARLANE, D.F.; PATTLE, A.D.; SALT, G. (1992). Nature and identification of Cromwell Gorge landslides groundwater systems. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 509-518.
- MAIONE, U. (1990). The Val Pola (Italy) rockslide : management problems of hydraulic emergency. *International Conference on River Flood Hydraulics*. Ed. W. R. White, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 501-510.
- MIEDAL, K.M.; MOORE, D.P. (1996). Long-term performance of instrumentation at Dutchmans Ridge. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1565-1570.
- MIGUEZ DE MELLO, F. (1996). Geological Aspects in Selecting Layouts of Dams. *8th Brazilian Congress on Engineering Geology*.
- MIGUEZ DE MELLO, F. (1985). Rehabilitation of Dams and Reservoirs. *Proceedings 16th Brazilian Congress on Large Dams, BCOLD*.
- MIKHAILOV, L.P.; PECHERKIN, I.A.; USPENSKY, S.M.; SOKOLNIKOV, U.N. (1982). Reservoir shores and engineering-geological aspects. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Q. 54*, p. 229-237.

- MILLER, D.J. (1960). Giant waves in Lituya Bay, Alaska. *US Geological Survey Professional Paper 354 - C*, p. 51-86.
- MILLET, R.A. ; LAWTON, G.M. ; REPETTO, P.C. ; GARGA, V.K. (1992). Stabilisation of Tablachaca Dam landslide. *Proceedings ASCE Specialty Conference "Stability and Performance of Slopes"*, Berkeley.
- MOORE, D.P. (1990). Stabilisation of Dutchmans Ridge. *Geotechnical News 8 (4)*, December 1990, p. 47.
- MOORE, D.P. ; IMRIE, A.S. ; BAKER, D.G (1991). Rockslide risk reduction using monitoring. *Proceedings Canadian Dam Safety Conference, Whistler, B.C.*
- MOORE, D.P.; IMRIE, A.S. (1992) Stabilisation of Dutchmans Ridge. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1783-1788.
- MORALES ARNAO, B. ; GARGA, V.K. ; WRIGHT, R.S. ; PEREZ, J-Y. (1984). The Tablachaca Slide No.5, Peru, and its stabilisation. *Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto*, p. 597-604.
- MORGENSTERN, N.R. (1982). The analysis of wall supports to stabilize slopes. In *Application of walls to landslide control problems. Proceedings of two sessions, ASCE National Convention, Las Vegas (R.B. Reeves, ed.)*, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., p. 19-29.
- MÜLLER, L. (1964). The rock slide in the Vaiont valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology 2*, p. 148-212.
- MÜLLER, L. (1968). New considerations on the Vaiont Slide. *Rock Mechanics and Engineering Geology 6*, p. 1-91.
- MÜLLER, L. (1987). The Vajont Catastrophe – a personal view. *Engineering Geology 24 – Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 423-444.
- MÜLLER, D. (1995). Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren (*Runup and overtopping of impulse waves on Dams*), Mitteilung 137, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- MYLREA, F.H. ; DICK, R.C. ; HAY, D. (1978). Stability of reservoir slopes. *Symposium on the Mica Project, American Power Conference, Vol. 40*, p. 1040-1048.
- NAKAMURA, H. (1985). Mechanism of reservoir-induced landslides. *Proceedings 4th International Field Workshop Landslides*, p. 219-226.
- NOGUERA, G. ; GARCES, E. (1988). Colbun reservoir seepage. *Proceedings 16th ICOLD Congress, C.18*, p. 1223-1235.
- NONVEILLER, E. (1987). The Vajont Reservoir slope failure. *Engineering Geology 24 - Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 493-512.
- O'ROURKE, J.E. ; BLACK, J.H. ; SARAF, C.L. ; MORALES ARNAO, B. (1985). Field monitoring and predictive model for the Tablachaca Dam landslide. *Proceedings 15th ICOLD Congress, Lausanne*, p. 1125-1140.

- OTTO, B. ; HAUENSTEIN, W. (1997). Stability of rock slopes at the banks of reservoirs. Selected case study from a Swiss hydropower scheme. *Proceedings 19th ICOLD Congress, Florence, Q. 74 R. 42*, p. 683-700.
- PASTOR, M. ; CIFRES, E. (1998). Propuesta de modelización de la activación de deslizamientos de ladera es embalses. Aplicación del prototipo al Embalse de Arenos. (Activation model proposal of landslides into reservoirs. Application prototype to Arenos Dam lake case). CEDEX-CH-JUCAR, Spain.
- PECK, R.B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique 19*, p. 171-187.
- PEGGS, D.R.D. ; VALLIAPPAN, P. (1982). The behaviour of sensitive marine clay reservoir slopes. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro*, p. 131-149.
- POPESCU, M.E. (1996). From landslide causes to landslide remediation. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 75-96.
- PUGH, C. A. ; HARRIS, D. W. (1982). Prediction of landslide-generated water waves. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro, Q. 54, R. 20*, p. 283-315.
- REEVES, R.B., ed (1982). *Application of walls to landslide control problems*. Proceedings of two sessions, ASCE National Convention, Las Vegas. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.
- REPETTO, P.C. (1985). The Tablachaca Dam slide No.5 problem. *Proceedings 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*. p. 2599-2610.
- RIEMER, W. ; RUPPERT, F.R. ; LOCHER, T.C. ; NUÑEZ, I. (1988). Regional assessment of slide hazards. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, p. 1223-1226.
- RIEMER, W. (1992). Landslides and reservoirs. Keynote Paper. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1973-2004.
- RIEMER, W. ; PANTZARTZĪ, P. ; KRAPP, L. ; SCOURTIS, C. (1996). Investigation and monitoring of landslides at the Polyphyton project in Greece. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 357-362.
- SAITO, M. (1980). Semi logarithmic representation for forecasting slope failure. *Proceedings 3rd International Symposium on Landslides, New Delhi*.
- SAVKIN, V.M. (1977). Shore dynamics of large reservoirs impounded behind hydroelectric plants in Siberia and experience with their engineering protection. *Hydrotechnical Construction 4*. p. 374-377.
- SCHNEEBERGER, C. ; LANGLOIS, P. ; LEVAY, J. ; BONCAMPAIN, B. (1991). Closure of La Grande 1 reservoir across a sensitive clay terrace. *Proceedings Annual Meeting Canadian Electrical Association, Hydraulic Power Section*.
- SCHUSTER, R.L.; FLEMING, R.L. (1982). Geologic aspects of landslide control using walls. In *Application of walls to landslide control problems. Proceedings of two sessions, ASCE National Convention, Las Vegas (R.B. Reeves, ed.)*, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., p. 1-18.

- SCHUSTER, R.L.; COSTA, J.E. (1986). A perspective on landslide dams. *In Landslide dams: processes, risk and mitigation (R.L. Schuster, ed.)*. ASCE Geotechnical Special Publication 3 : p. 1-20.
- SCHUSTER, R.L. (1992). Recent advances in slope stabilisation. Keynote Address. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1715-1746.
- SCHWAB, H.; PIRCHER, W. (1982). Monitoring and alarm equipment at the Finstertal and Gespach rockfill dams. *Proceedings 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro, Q. 52*, p. 1047-1076.
- SEMBENELLI, P. (1986). Reflections on the methodology in engineering geology. The Vajont Case. *Proceedings Meeting on the 1963 Vajont Landslide, Ferrara* (Ed. Semenza & Melidoro), p. 87-112.
- SEMENZA, E. (1965). Sintesi degli studi geologici sulla frana del Vajont dal 1959 al 1964. *Memorie Museo Tridentino di Scienze Naturali*, 16 : 1-52.
- SZPILMAN, A.; REN, C. (1976). The effect of landslide on Furnas Reservoir. *Proceedings 12th ICOLD Congress, Mexico City Q. 47*, p. 1109-1120.
- STAPLEDON, D.H. (1992). Geological modelling in landslide investigation. Keynote Paper. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1499-1523.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1996). *Landslides : investigation and mitigation* TRB Special Report 247. Eds A.K Turner & R.L. Schuster. National Academy Press, Washington DC.
- UNITED NATIONS DEPARTMENT OF HUMANITARIAN AFFAIRS (1996). Mudflows – Experience and Lessons Learned from Major Disasters.
- VISCHER, D.L. (1986). Rockfall-induced waves in reservoirs. *Water Power and Dam Construction 47 (9)*, p. 45-48.
- VISCHER, D.; FUNK, M.; MÜLLER, D. (1991). Interaction between a reservoir and a partially flooded glacier : Problems during the design stage. *Proceedings of the 17th ICOLD Congress, Vienna, Q. 64 R. 8*, p. 113-135.
- VISCHER, D. L. ; HAGER, W. H. (1997). *Dam Hydraulics*. John Wiley and Sons.
- VOIGHT, B. (1979). Editor. *Rockslides and Avalanches*, Elsevier, Amsterdam.
- WONG, H.N.; HO, K.K.S.; CHAN, Y.C. (1997). Assessment of Consequences of Landslides. *Proceedings of International Workshop on Landslides Risk Assessment*, Honolulu, USA. Balkema.
- ZARUBA, Q.; MENCL, V. (1982). *Landslides and their Control*, 2nd edition. Elsevier, Amsterdam p. 324.

APPENDICES/ ANNEXES (*)

Appendix A Selected case histories

Annexe A Exemples choisis

Appendix B Questions to ask during reservoir landslide investigations

Annexe B Questions à poser au cours des reconnaissances et études des glissements de versants de retenues

Appendix C Checklists for reservoir landslide investigations

Annexe C Listes de contrôle pour les reconnaissances et études des glissements de versants de retenues

Appendix D Japanese guidelines for prioritising reservoir landslide investigations

Annexe D Recommandations japonaises pour le classement par ordre de priorité des reconnaissances et études des glissements de versants de retenues

(*) In English only / En anglais seulement

APPENDIX A - SELECTED CASE HISTORIES

A-1 : Vaiont Slide, Italy

A-2 : Tablachaca Slide No.5, Peru

A-3 : Dutchmans Ridge, Canada

A-4 : Cromwell Gorge Landslides, New Zealand

A-1 : VAIONT SLIDE, ITALY

The large volume (more than 270 million cubic metres) and high velocity (up to 30 m/s) slide into the newly filled Vaiont reservoir on a tributary of the Piave River in Northern Italy (Fig. A1-1) on October 9, 1963 caused an overtopping wave which resulted in massive destruction and loss of life. It has become a precedent landslide, largely responsible for a marked change in the emphasis placed on the stability of reservoir slopes in recent decades.

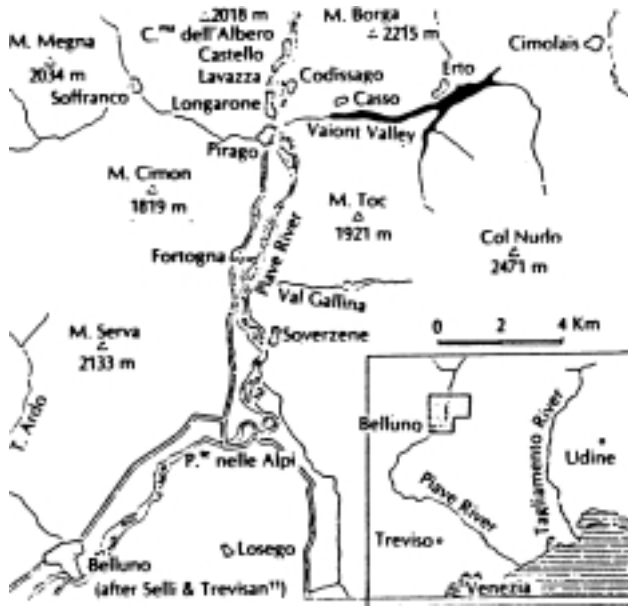


Fig. A1-1

Location of Vaiont reservoir
(from Hendron & Patton, 1986)

Geological setting

The Vaiont Slide developed on the north slopes of Mt. Toc where the Vaiont River had cut a narrow gorge more than 300 m deep within a broader glaciated valley. In this area, the mountains are characterised by near-vertical cliffs formed in the Jurassic Dogger Formation and underlying Triassic formations. The Dogger Formation (massive limestones) is overlain by more thinly bedded, weaker Upper Jurassic, and Cretaceous units that contain more clay (Hendron & Patton, 1986). The Vaiont Valley has been eroded along the axis of an asymmetrical syncline, plunging upstream. The dam was constructed in the inner gorge, on Dogger Formation; the slide involved the overlying rock units.

Slide details

The failure involved a rock mass 250 m thick which slid 300-400 m horizontally before running up and stopping against the opposite side of the valley (Fig. A1-2,

A1-3). The slide filled the lower half of the Vaiont reservoir (which had been drawn down to EL 700 m from EL 710 m at a rate of 1 m/day just prior to the event) in a few tens of seconds.

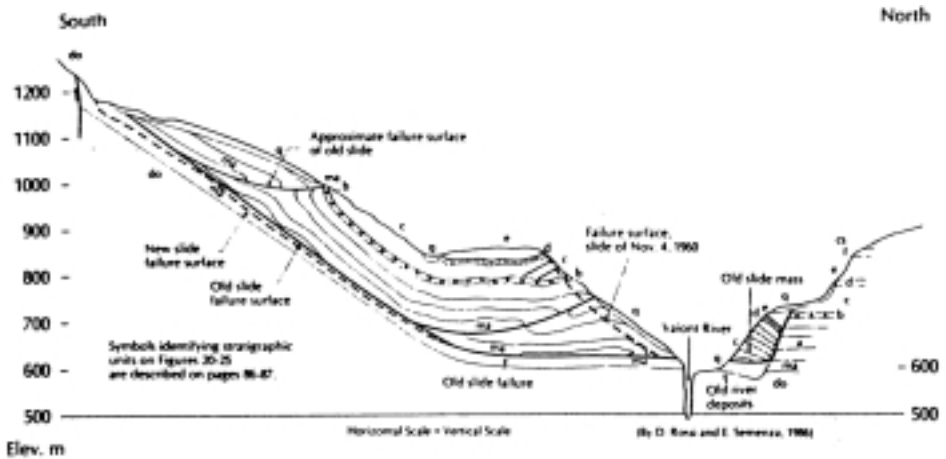


Fig. A1-2
 Cross section through Vaiont Slide prior to failure
 (from Hendron & Patton, 1986)

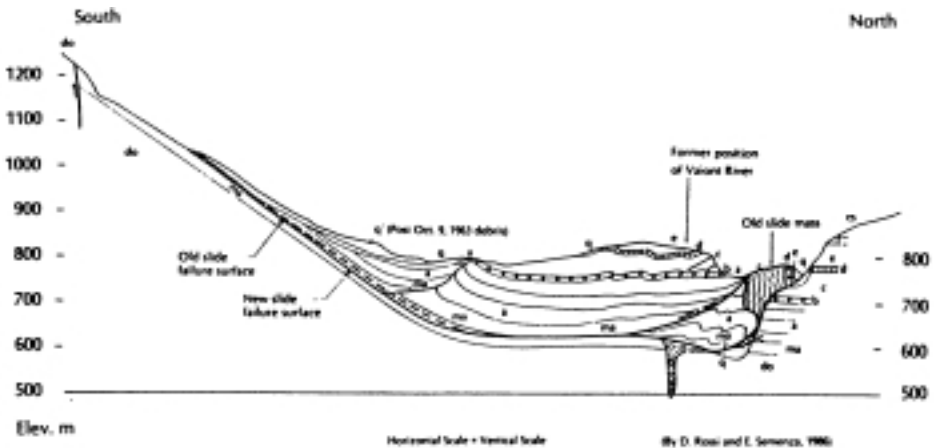


Fig. A1-3
 Cross section through Vaiont Slide after failure
 (from Hendron & Patton, 1986)

The wave resulting from the displaced water propagated both upstream and downstream, passed over the dam with a height of about 100 m and was still 70 m high at the confluence of the Vaiont Valley with the Piave River. It destroyed most of the town of Longarone and parts of other towns in the Piave Valley. Over 2000 people died. The dam, a concrete arch, survived with little damage.

Sequence of events

Excavation for the dam was undertaken in 1956-57, and dam construction commenced in July 1957. At this time there were no concerns about slope stability around the reservoir, but in mid-1959 geological studies raised doubts about the stability of the left bank (Hendron & Patton, 1986). Drilling was subsequently initiated in early 1960. Reservoir filling began in February 1960 and the following sequence of events occurred :

1. During the first reservoir filling, water level was raised from EL 580 m (March 1960) up to EL 645 m (at Nov. 1960). On 4 November 1960 a 700 000 m³ rockfall occurred on the left side of the valley just upstream from the dam over a period of about ten minutes. Cracking had previously been noted in this area as the lake was raised.
2. Opening of a perimeter crack, about 2 500 m length over an area of 2 km²; moving rock mass estimated at about 200 Mm³. Hendron & Patton (1986) indicate that this crack was first detected in October 1960, when the reservoir was at EL 635 m, and that it was approximately along the perimeter of the October 1963 slide. At this stage it was believed that slope failure could occur but would be by progressive sliding, not as a rapid failure. Hydraulic model studies of slide induced reservoir wave phenomena were requested.
3. In November-December 1960, the lake was drawn down to EL 600 m.
4. In early 1961 it was decided to construct a by-pass tunnel 2 200 m in length, through the right bank in competent rock, as an emergency diversion tunnel. The reservoir was held below EL 600 m throughout the construction period (February to October 1961).
5. At this stage, a progressive slide down to the gorge was considered acceptable. It was expected that slow and controlled movements would cause increasing passive resistance at the toe and that the slide mass would eventually reach equilibrium (self-buttress) after several cycles of filling and lowering of the reservoir water levels.
6. Between October 1961 and February 1962, the reservoir was raised from EL 590 m to EL 650 m. No significant movements were detected.
7. By November 1962, the reservoir was at EL 700 m. Heavy rains in the early part of the month were followed by increased movement rates. The lake was lowered very slowly to EL 650 m by March 1963, and movement almost ceased.
8. Between April and May 1963 the reservoir was raised to EL 696 m, then to 705 m by mid-July. From mid-August to early September 1963, the reservoir was raised to EL 710 m. Heavy rainfalls occurred in mid-August and higher than usual rainfall continued over the following 3 weeks. The rate of displacement increased in early September.
9. Slow drawdown (1 m/day) was initiated in late September. Following rain, movement rates increased again in early October and were later reported to have reached 200 mm/day on 9 October (Hendron & Patton, 1986).
10. Failure occurred at 10.39 pm on 9 October 1963, with the reservoir at EL 700.4 m.

Fig. A1-4 compares water levels with slide movements and rainfall in the period from the start of reservoir filling in 1960 to failure in October 1963.

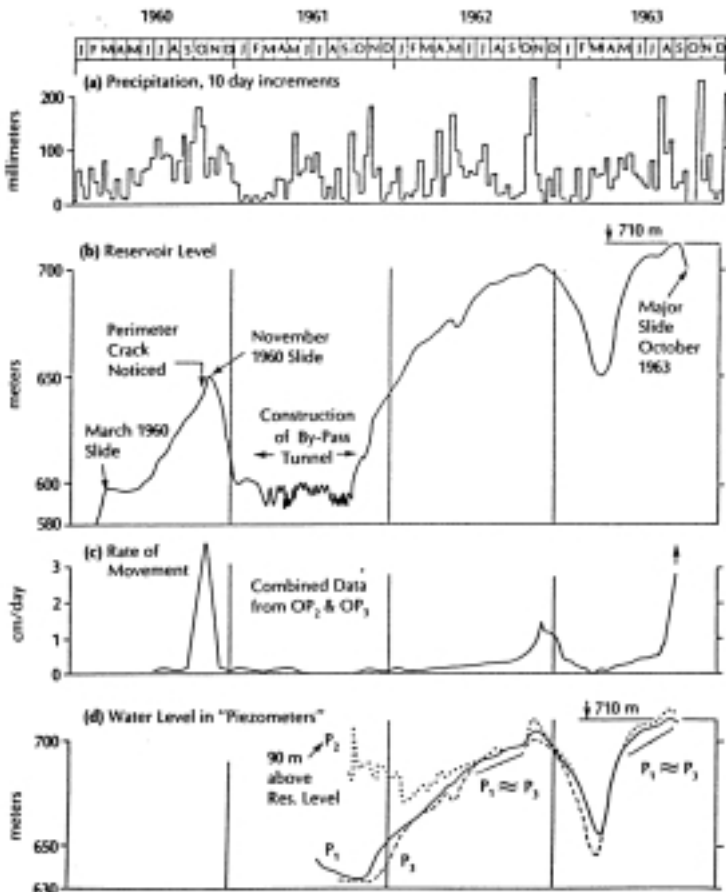


Fig. A1-4

Comparison of water levels, slide movements and rainfall 1960-1963
(from Hendron & Patton, 1986)

Following this event, numerous investigations were made by eminent specialists. Their reports showed no general agreement on important issues such as the presence of clays along the failure surface, water pressures, the failure mechanism and whether the slide was a first time event or reactivation of an old slide. The most definitive published study was completed by Hendron & Patton (1985), some 22 years after the original failure.

The Vaiont experience showed the geotechnical profession and the owners of dams and reservoirs :

- that pre-existing landslides can be highly sensitive and can be reactivated with devastating results when a reservoir is formed against them
- the importance of a thorough understanding of the geology (lithology, structure, material properties) and hydrogeology of the reservoir rim

- the importance of searching for, recognising and evaluating precedent evidence for past instability in the reservoir basin
- the significance of weak seams or layers in a slope, especially if inclined towards the reservoir
- the need for sufficiently reliable models for geotechnical analysis, with clear acknowledgement of their uncertainties or limitations
- the effect of changing reservoir levels on slope stability
- the significance of the joint effects of rapid reservoir level changes and the various influences of rainfall on slope stability
- the value of reliable monitoring data, prompt data evaluation and appropriate responsive actions
- the difficulty in predicting time of failure, landslide velocity and subsequent wave size
- worst case scenarios must be taken into account.

Note : Since the preparation of the Bulletin and prior to printing, an additional significant reference on the Vaiont Slide, involving one of the original project geologists and utilising unpublished documents was published. The reference has not been reviewed by the Committee, but is given for information.

SEMENZA, E. ; GHIRTOTTI, M. (2000). History of the 1963, Vaiont Slide : the importance of geological factors. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* (2000) V59 : 87-97.

References

- BROILI, L. (1967). New knowledges on the geomorphology of the Vaiont slide slip surfaces. *Rock Mechanics and Eng.Geology* 5, p. 38-88.
- HENDRON, A.J. ; PATTON, F.D. (1985). The Vaiont Slide, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. *US Army Corps of Engineers, Technical Report GL85-5, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Volumes I and II.*
- HENDRON, A.J. ; PATTON, F.D. (1986). A Geotechnical Analysis of the Behaviour of the Vaiont Slide. *Civil Engineering Practice* 65-130.
- KENNEY, T.C. (1967). Stability of the Vaiont Valley slope. *Rock Mechanics and Eng. Geology* 5, p. 10-16.
- KIERSCH, G.A. (1964). Vaiont Reservoir disaster. Geologic causes of tremendous landslide accompanied by destructive flood wave. *Civil Engineering, Vol. 34, No.3*, p. 32-39.
- MÜLLER, L. (1964). The rock slide in the Vaiont Valley. *Rock Mechanics and Eng. Geology* 2, p. 148-212.
- MÜLLER, L. (1968). New considerations on the Vaiont Slide. *Rock Mechanics and Eng. Geology* 6, p. 1-91.
- SEMBENELLI, P. (1986). Reflections on the methodology in engineering geology. The Vajont Case. *Proc. Meeting on the 1963 Vajont Landslide, Ferrara* (Ed. Semenza & Melidoro), p. 87-112.

SEMENZA, E. (1965). Sintesi degli studi geologici sulla frana del Vajont dal 1959 al 1964. *Memorie Museo Tridentino di Scienze Naturali*.

Additional references

BELLONI, L.G.; STEFANI, R. (1987). The Vajont Slide : Instrumentation - past experience and the modern approach. *Engineering Geology 24 - Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 445-474.

MÜLLER, L. (1987). The Vajont Catastrophe – a personal view. *Engineering Geology 24 – Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 423-444.

HENDRON, A.J.; PATTON, F.D. (1987). The Vajont Slide - a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. *Engineering Geology 24 - Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 475-491.

NONVEILLER, E. (1987). The Vajont Reservoir slope failure. *Engineering Geology 24 – Special Issue on Dam Failures. Proceedings of the International Workshop on Dam Failures, Purdue University August 6-8, 1985*, p. 493-512.

TIKA, T.; HUTCHINSON, J.N. (1999). Ring Shear Tests on soil from the Vajont Landslide Slip Surface. *Geotechnique 49, N1, p 59-74, Feb 1999*.

A-2 : TABLACHACA SLIDE NO. 5, PERU

Project details

The Tablachaca dam and reservoir on the Mantaro River in the Central Andes of Peru is situated about 300 km from Lima (Fig. A2-1), in a seismically active area with a history of large, valley-blocking landslides. Water from the reservoir is diverted through a 20 km long pressure tunnel to a 798 MW power plant, and then through another tunnel to a second (216 MW) power plant. These two power plants provide a large proportion of the capacity of Central Peru.



Fig. A2-1

Location of Tablachaca reservoir
(from Millet *et al*, 1992)

Several large, ancient landslides are present around the reservoir. Slide No. 5, immediately upstream from the right abutment of the 72 m high concrete gravity dam, was noticed before construction but judged to be superficial, according to Hutchinson (1986). No remedial works and few investigations were undertaken prior to lake filling.

During initial filling in September 1972, the reservoir was raised from EL 2 640 m (river level) to EL 2 695 m (normal storage level). Lake filling initiated movement in the central and upstream parts of slide No. 5, and about 60 000 m³ of debris entered the reservoir at velocities approaching 0.5 m/day (Morales *et al*, 1984 ; Hutchinson, 1986). Because of this, the reservoir was lowered and subsequent movements monitored. A second failure, involving about 5 000 m³ of debris, occurred immediately upstream from the dam between December 1972 and January 1973. The reservoir continued to operate as planned, with frequent and rapid

drawdowns (Deere & Perez, 1985). Moderate movements continued but were not systematically measured until 1979 when intense rains occurred and the slide was again visibly active. Geoaoustic measurements in 1978 showed that the slide began to move when the reservoir level exceeded about EL 2 680 m (Morales *et al*, 1984).

Nature and extent of landslide

Investigations and monitoring initiated in 1979 showed that the superficial slides previously observed were in fact part of a much larger slide. Subsequent investigations indicated that the slide mass could be divided into an upper zone (initially inferred inactive) and a lower, active zone. Drilling and inclinometer monitoring later showed the active slide to be up to 80 metres deep and that the upper slide was in fact creeping on a failure surface at 125 m depth (Deere & Perez, 1985).

As shown by Fig. A2-2, the slide extends from EL 2 660 m to EL 3 200 m on a slope with inclination 37° to 40° . The lower part of the slide has a width of about 300 m, a volume of 3 million m^3 and extends up to about EL 2 850 m. The upper part has a volume of about 10 million m^3 .

The slide mass is essentially a melange of broken black phyllite and brown quartzitic phyllite slabs and fragments in a matrix of gravel, sand and silt-sized detritus. It over-rides black (graphitic) phyllite in its upstream three quarters and quartzitic phyllite closer to the dam, which is founded on quartzitic phyllite. A gouge zone several metres thick occurs on the contact and is believed to act as an aquiclude (Morales *et al*, 1984).

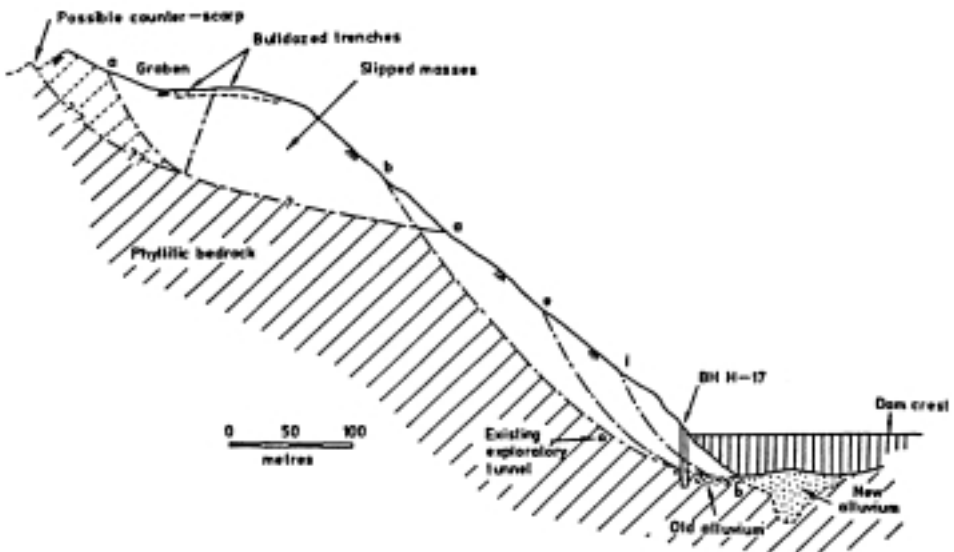


Fig. A2-2
Simplified geological section through the Tablachaca Slide No. 5
(from Hutchinson, 1986)

Piezometric data indicated that the water table within the slide mass approximated reservoir level and was well below slide base in the quartzitic phyllite rockmass behind the slide at the downstream end (O'Rourke *et al*, 1985). In the more fractured graphitic phyllite the head of drainable water was at and above slide base. Morales *et al* (1984) recognized two separate groundwater systems : a regional water table within the phyllite below the slide and perched water within the slide, recharged by infiltration after rainfall.

Surface survey monitoring data for the faster moving downstream part of the slide showed increasing rates of movement each rainy season (see Fig. A2-5). By the end of the 1981/82 rainy season, rates of up to 20 mm/day were being measured (Morales *et al*, 1984) and there was serious concern that a very large mass was in danger of sliding into the reservoir (Millet *et al*, 1992). It was decided that emergency stabilisation works were necessary to protect the reservoir and assure continued operation of the power plants, and the reservoir was restricted to minimum pool level.

Instrumentation

Instrumentation installed to define the slide and its behaviour consisted of :

- surface monuments for geodetic survey
- inclinometers
- precision displacement monitoring lines employing a portable tape extensometer system
- tilt monitoring of some survey monuments
- tape extensometers installed to monitor slide base movements from the drainage tunnels
- standpipe and 24 vibrating wire piezometers. Typical installations used 3 vibrating wire piezometers located above, within and below the inferred slide plane hydraulic load cells on selected rock anchors installed as part of the emergency stabilisation works.

Most of the geotechnical instrumentation was not installed until near the end of the 1982/83 rainy season (O'Rourke *et al*, 1985).

Emergency stabilisation works

Stabilisation works were undertaken between early 1982 and late 1984. The design objectives were to increase the static factor of safety to 1.2 in all sections of the slide and to limit seismic displacements to 0.4 m in zones with anchors and 1 m in zones without anchors (Repetto, 1985). A requirement of the works was that they not interfere with operation of the low level sluices which are necessary for the flushing of sediment from the reservoir. The completed works (Fig. A2-3 and A2-4) consisted of :

- a 467 000 m³ free draining toe buttress. This was constructed on sediment deposited within the reservoir between 1972 and 1982, and required foundation improvement using compacted stone columns,
- 120-tonne working load, prestressed anchors up to 110 m long were installed at three levels in the area close to the dam (where a buttress would impinge on the low level sluice gates),

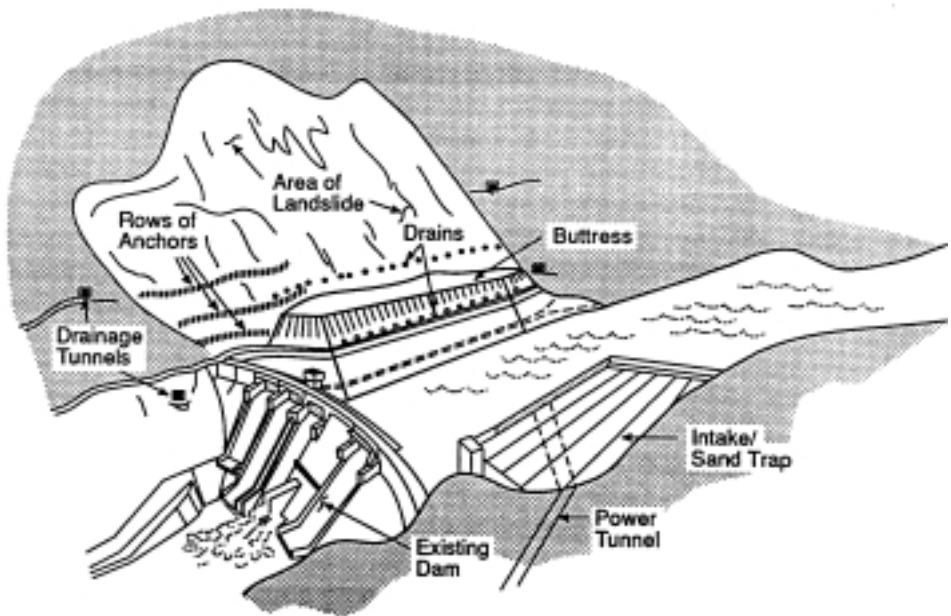


Fig. A2-3
 Overview of emergency works
 (from Millet *et al*, 1992)

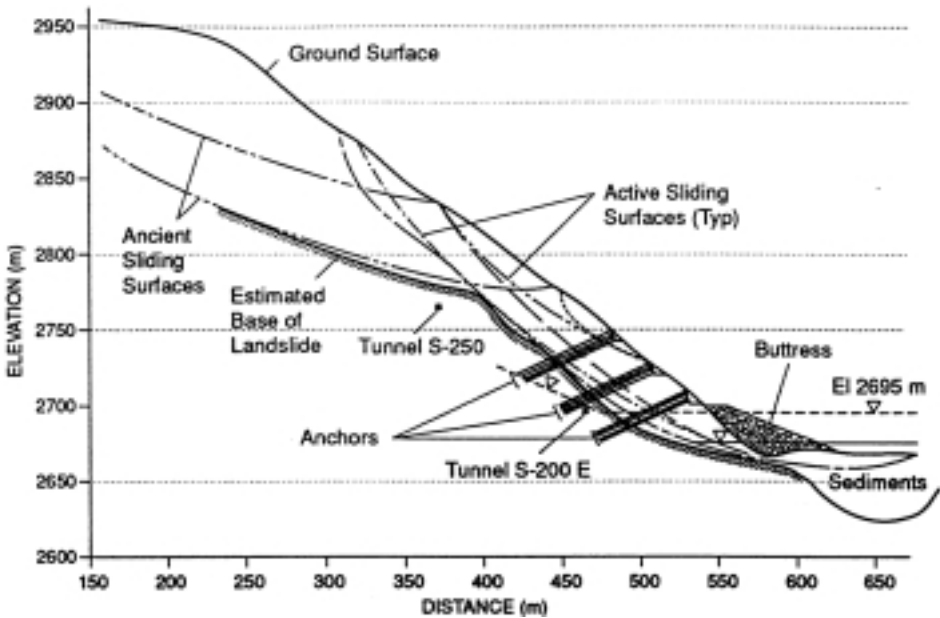


Fig. A2-4
 Cross section showing stabilisation works
 (from Millet *et al*, 1992)

- 1 300 m of drainage tunnels excavated below the slide and 190 radial drains (total length 3 300 m) installed from the tunnels,
- horizontal toe drains, with a total length of 1 300 m,
- excavation (68 500 m³) of a rock protrusion in the river upstream from the landslide (so the main flow of the river would not impinge on the buttress),
- surface works to intercept and divert runoff.

Effectiveness of emergency stabilisation works

There is no published data to clearly demonstrate the effectiveness of the emergency stabilisation works. Morales *et al* (1984) show that significant drawdown was achieved by the drainage works. Displacement data given by Repetto (1985) suggests that a dramatic reduction in deformation rates was achieved almost immediately (Fig. A2-5). This is supported by Morales *et al* (1984) who indicate that the most active part of the slide was moving at 1.2 mm/day in January 1984, compared with 20 mm/day in February 1982.

However, Repetto noted that the data covered rainy seasons that were not as wet as the previous years and commented that a much longer monitoring period would be needed to confirm apparent trends. Millet *et al* (1992) stated that there has been no significant movement of the landslide since completion of the emergency works but did not provide supporting data. Riemer (1992) commented that “ the slide has decelerated noticeably but creep is still observed ”, but was unable to provide supporting data.

The design of additional engineering works required to achieve permanent stabilisation was completed in 1984. It is not known if these works have been implemented.

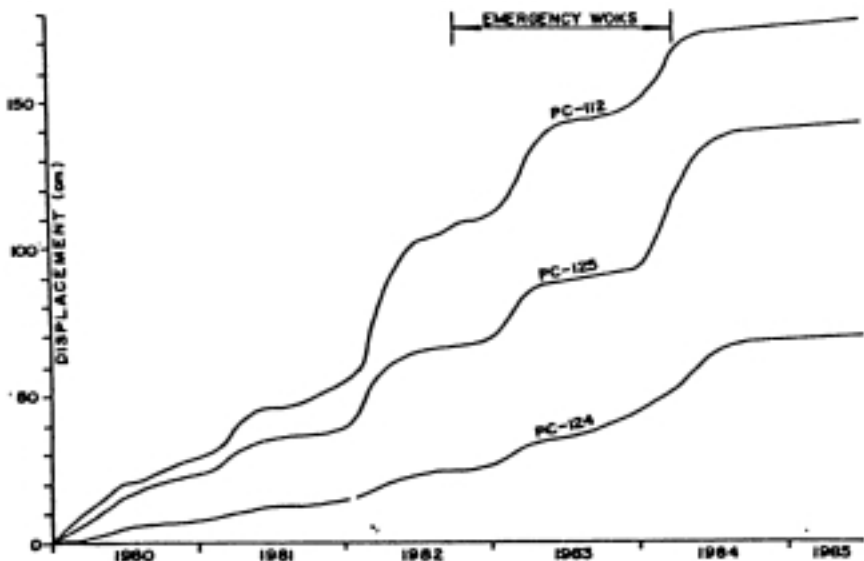


Fig. A2-5
Surface displacement data 1980-1985
(from Repetto, 1988)

Key lessons

Important lessons from the Tablachaca experience (Hutchinson, 1986; Millet *et al*, 1992) are :

- ancient slides can be reactivated in response to lake filling
- toe erosion caused by reservoir operations can be a significant factor in the behaviour of debris slides
- large, active landslides on reservoir margins can be successfully stabilised
- controlling the movement of landslides on reservoir perimeters may require a combination of measures
- high quality monitoring was important in detecting a worsening situation and alerted the need for further investigation and remedial works
- long term monitoring is necessary to confirm the effectiveness of stabilisation works
- slope stability problems that are not fully appreciated during project development can have serious financial impact during operation.

References

- DEERE, D.U.; PEREZ, J-Y. (1985). Remedial measures for large slide movements. *Proceedings of PRC-US-Japan Trilateral Symposium/Workshop on Engineering for Multiple Natural Hazard Mitigation, Beijing*. pL-7-1 to L-7-15.
- HUTCHINSON, J.N. (1986). Further observations on Slide No.5, Tablachaca Reservoir, Rio Mantaro, Peru. *Proc. Meeting on the 1963 Vaiont Landslide, Ferrara, 1986*, p. 53-65.
- MILLET, R.A.; LAWTON, G.M.; REPETTO, P.C.; GARGA, V.K. (1992). Stabilisation of Tablachaca Dam landslide. *Proceedings ASCE Specialty Conference 'Stability and Performance of Slopes', Berkeley*.
- MORALES ARNAO, B.; GARGA, V.K.; WRIGHT, R.S.; PEREZ, J-Y. (1984). The Tablachaca Slide No. 5, Peru, and its stabilisation. *Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto*, p. 597-604.
- O'ROURKE, J.E.; BLACK, J.H.; SARAF, C.L.; MORALES ARNAO, B. (1985). Field monitoring and predictive model for the Tablachaca Dam landslide. *Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne*, p. 1125-1140.
- REPETTO, P.C. (1985). The Tablachaca Dam slide No.5 problem. *Proceedings 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*, p. 2599-2610.

A-3 : DUTCHMANS RIDGE, CANADA

Project details

Dutchmans Ridge is a steep bedrock slope located 1 500 m upstream from the 247 m high Mica Dam on the Columbia River, British Columbia. The slope is a 15 Mm³ potential rockslide, which has been studied since 1961. The toe was inundated to a depth of 180 metres by filling of the reservoir in the early-mid 1970's. Following the detection and monitoring of movements, stabilisation works were implemented about 10 years after lake filling.

Geology

Dutchmans Ridge rises 1 450 m from the floor of the Columbia River Valley at an overall slope of about 30° (Fig. A3-3). The lower slope is crossed by several ridges and troughs which trend sub parallel to the topographic contours. Foliation in the hornblende and quartzite gneisses and interbedded mica schists forming the ridge strikes into the slope and dips 60-80°SW. Investigations during the period between 1961 and 1970 identified a tectonic fault, dipping 29° SE towards the reservoir, beneath the lower part of the ridge. This feature forms the base of the potential rockslide. It consists of a 1.5 to 40 m thick zone of crushed and decomposed rock encasing an essentially continuous gouge seam typically less than 2 m thick.

The rock overlying the Basal Fault is weathered and loose, indicating a substantial amount of ancient downslope creep (Moore & Imrie, 1992). No movements were detected during the few years of monitoring prior to lake filling. The decision was made to widen and strengthen the dam crest to protect it against erosion, and to monitor the slope.

The problem

Although not directly monitored, movement of the slope at a rate of several centimetres/year occurred during lake filling which took place between 1973 and 1976 (Moore, 1990). Additional investigations and monitoring confirmed that the rockmass was creeping downslope along the fault, and that reservoir filling had reactivated the ancient slide. The rate slowed to a steady rate of less than 10 mm/year during normal operation (Moore, 1990; Moore & Imrie, 1992; Meidal & Moore, 1996). At this point the owner, BC Hydro, was faced with the difficult decision of whether to simply continue monitoring or whether to proceed with stabilisation. It was eventually agreed that although a rapid slide did not seem likely, any large slide would be extremely disruptive to the operation of the power plant. On this basis, it was decided to proceed with stabilisation.

Stabilisation works

Between 1986 and 1988, Dutchmans Ridge was stabilised by constructing an 872 metre long adit across the slope, mainly just below the Basal Fault Zone (Fig. A3-1 & A3-2), and the drilling of 12 700 metres of drainholes from the adit (Moore & Imrie, 1992; Meidal & Moore, 1996).

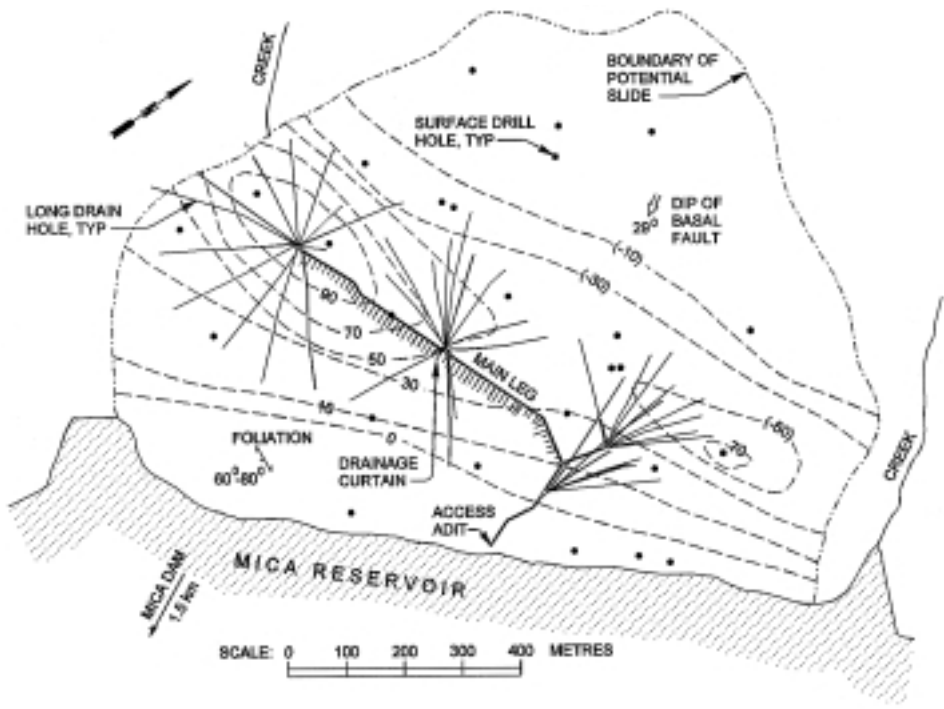


Fig. A3-1

Drainage system layout with contours showing reduction in water levels in metres (from Moore & Imrie, 1992)

Prior to construction, 267 piezometers, mainly of the Westbay type, were installed to allow observation of the effects of the remedial works. This would also allow modification of the works, if necessary, to maximize their effectiveness. Piezometers were installed both above and below the Basal Fault Zone because it acted as a flow barrier and had water pressures on both sides. This necessitated achieving drainage on both sides of the fault. A gravity drainage option was considered preferable so the adit and drainhole collars were all located above reservoir level (Moore & Imrie, 1992).

The objective of the drainage was to restore the stability of the slope to that which had existed before lake filling. Completely stopping the movements was not a design criterion. It was expected that once stability was restored, the slope would behave as it had in the past. In particular, the slope would be able to withstand any earthquakes in the same manner that it had withstood past earthquakes, and thus the possibility of a catastrophic slide would be reduced to acceptable levels (Moore & Imrie, 1992).

Effectiveness of stabilisation works

The drainage works resulted in widespread reduction of water levels at the base of the slide. Original heads of 0 to 126 metres (average 36 m) at the Basal Fault

where it was above reservoir level were reduced to an average of 10 metres. As shown by Fig. A3-3, after several years the average movement rate had reduced to 0.8 mm/yr (Meidal & Moore, 1996).

The calculated change in factor of safety due to reservoir filling is very sensitive to assumptions of failure surface geometry and pre-reservoir water pressures at the toe of the slope (Moore & Imrie, 1992). There is very little knowledge of these water pressures. In contrast, there is good knowledge of the pre-drainage and post-drainage water pressures. The average increase in factor of safety due to the drainage works is 6 %. This is considered greater than the decrease due to reservoir filling.

Long term monitoring

An extensive monitoring and data acquisition system was installed, mainly in 1985-86, to monitor Dutchmans Ridge. The instrumentation consists of 13 multi-port piezometers (with a total of 246 individually isolated measurement zones), 7 nests of standpipe piezometers, ten inclinometers, surface monuments, an extensometer measuring movements across slide base, and a flume measuring flows from the adit (Meidal & Moore, 1996). A continuous recording Automatic Data Acquisition System (ADAS) provides warning of changes in groundwater pressures, slope movements or flows from the adit. Changes could indicate a reduction in stability of the slope, which is crucial due to its proximity to the dam.

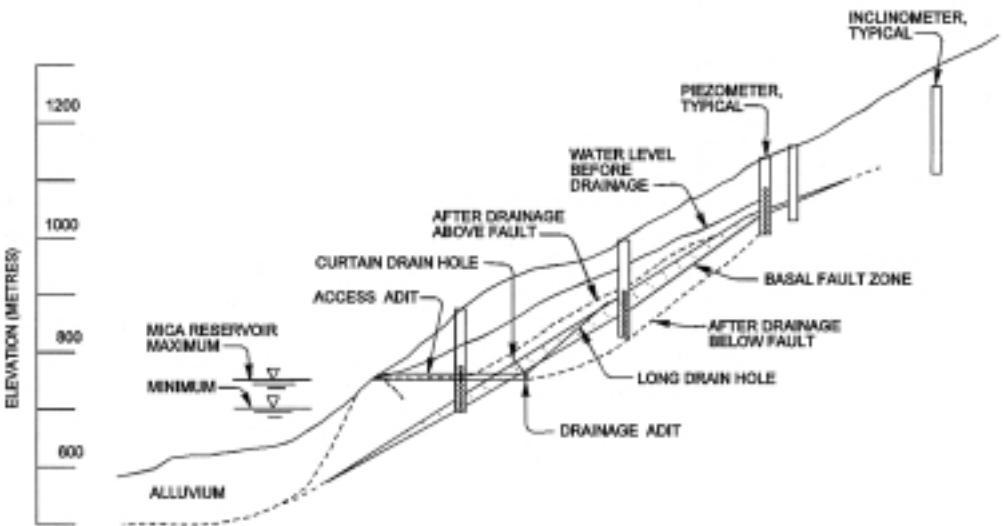


Fig. A3-2
Cross section showing water levels before drainage and post-drainage levels above (P1) and below (P2) the Basal Fault (from Moore & Imrie, 1992)

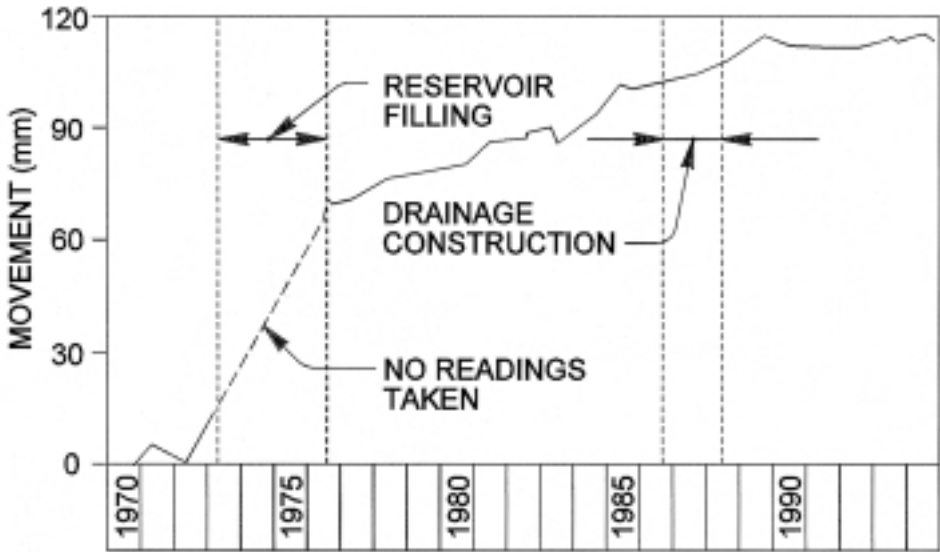


Fig. A3-3
Movements recorded at the Basal Fault Zone
(from Meidal & Moore, 1996)

The number of instruments continuously monitored has been reduced over time as the pattern of behavior and normal variations have been established. With well defined response procedures in place, only selected key instruments are now continuously monitored.

The ADAS not only provides early warning of behavior changes, but has also allowed reduction in the frequency of costly manual readings.

Key lessons

The successful stabilisation of Dutchmans Ridge by the use of drainage provided some important lessons for reservoir landslide risk management and remediation. These include :

- very large landslides can be controlled economically
- monitoring during lake filling is essential for detecting piezometric changes and changes to rates of movement in unstable or potentially unstable slopes affected by the formation of a reservoir
- good knowledge of the geology and groundwater conditions is essential to the design of a successful stabilisation programme
- various features in the rockmass may divide it into groundwater compartments with vastly different piezometric pressures
- penetration of each groundwater compartment is necessary to achieve full drainage benefits

- the “ observational method ” allows identification of the effectiveness of the works during construction, and enables design changes to achieve maximum benefit at minimal cost
- long term monitoring is crucial to on-going management of risk
- Automatic Data Acquisition System allows real time monitoring and early detection of a reduction in the stability of the slope.

References

- MOORE, D.P. (1990). Stabilisation of Dutchmans Ridge. *Geotechnical News* 8(4), December 1990, p. 47
- MOORE, D.P. ; IMRIE, A.S. (1992). Stabilisation of Dutchmans Ridge. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 1783-1788.
- MIEDAL, K.M. ; MOORE, D.P. (1996) Long term performance of instrumentation at Dutchmans Ridge. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1565-1570.

A-4 : CROMWELL GORGE LANDSLIDES, NEW ZEALAND

Project details

The Clyde Power Project is a hydro-electric development on the Clutha River in the South Island of New Zealand. Lake Dunstan, behind the 102 m high Clyde dam, inundates the toes of sixteen creeping or dormant landslides, most of which are located in the Cromwell Gorge (Fig. A-4.1).

The presence of the landslides was known at the time of site selection. Stabilisation works were recommended for the Cromwell and Clyde slides because of their proximity to Cromwell township and the Clyde Dam, respectively. Data obtained during highway reconstruction identified complex groundwater conditions in the Cromwell Gorge, quite dissimilar to those encountered within the Cromwell and Clyde landslides. At about the same time in 1987 monitoring data confirmed that several of the large landslides were creeping. Further exploratory work identified other areas of complex groundwater, and studies indicated some slide areas would be de-stabilised by reservoir inundation.

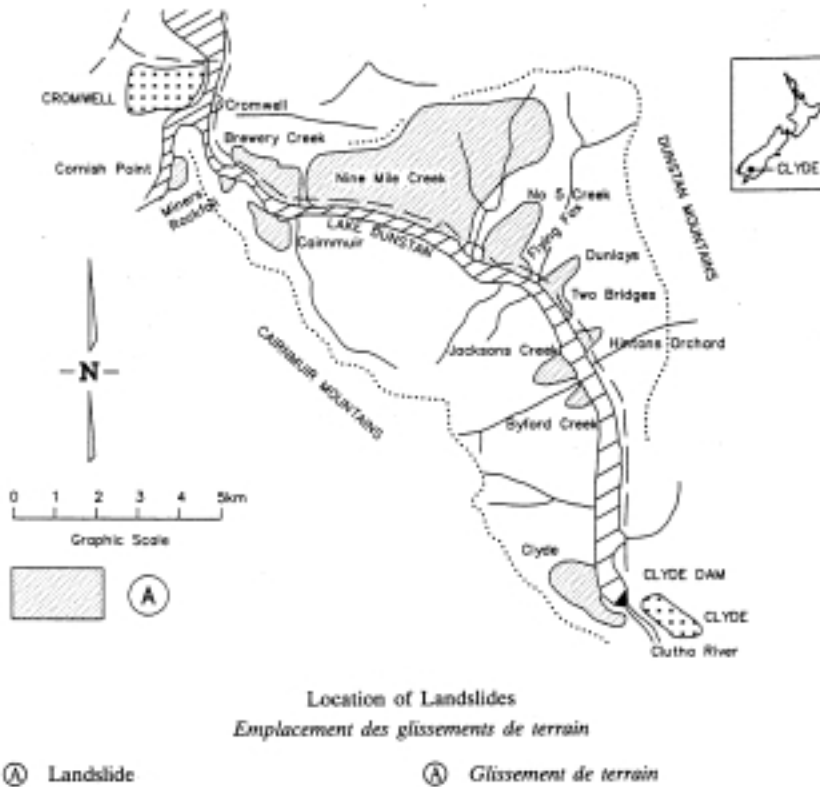


Fig. A4-1
Location of Clyde dam and Cromwell Gorge landslides
(from Gillon *et al*, 1997)

Lake filling was delayed from September 1989 to April 1992 during which time an intensive investigation programme and landslide stabilisation works were completed at an estimated cost of \$US 250 million. Lake Dunstan reached its final operating level in September 1993 after a staged lake filling process.

Nature and extent of landslides

Approximately 40 % of the Cromwell gorge is bordered by landslides, most of them formed in mica schist. Gillon & Hancox (1992) provide an overview of the nature and extent of landsliding along the Cromwell Gorge.

In general the landslides are subtle features, lacking prominent scarps. Geological evidence indicates that they are at least 50 000 years old and some may be over 250 000 years old. Despite the occurrence of large earthquakes in the area in the last 16 000 years, none of the landslides shows any evidence of ever having undergone large scale rapid sliding. Prior to lake filling, the landslides were either inactive or creeping at rates generally less than 20 mm/yr.

The largest slides have the potential to either block the reservoir or generate waves with dam overtopping or residential flooding consequences. Such slides were termed “ potentially catastrophic ”. All other slides were termed “ non-catastrophic ”.

The slides are all considered to be translational rock and debris slides controlled by rock mass defects. For a number of slides, simple groundwater gradients existed from the slope to the river, while in others complex conditions existed both within and below the slide mass (Macfarlane *et al*, 1992). The most unfavorable conditions involved confined aquifers below the slide base. Stability analysis indicated that those slides with confined sub-basal aquifers would be significantly de-stabilised with lake filling especially as the sub-basal groundwater is recharged from upslope infiltration.

Risk management

The risks to the project from the potential consequences of landslide rapid failure were managed by adopting the following strategies, which are discussed in detail by Gillon *et al* (1997) :

- detailed investigation and design of remedial works for all potentially catastrophic landslides
- adopting an observational approach for the non-catastrophic landslides
- appointing an International Board of Review
- developing appropriate instrumentation for both investigating the landslides and monitoring during and subsequent to lake filling
- extending the lake filling period to include specific hold points for detailed review of the slope model and slide behavior

- completing some additional remedial works during the staged filling of the reservoir
- separating reservoir control and safety responsibilities from commercial operation until there was a high level of confidence in the stability of the reservoir slopes
- developing appropriate Alarm, Incident and Emergency procedures
- continuing regular review of monitoring data and observation of the slides by local experts, and maintaining periodic International Review during the operational phase of the reservoir.

Stabilisation works

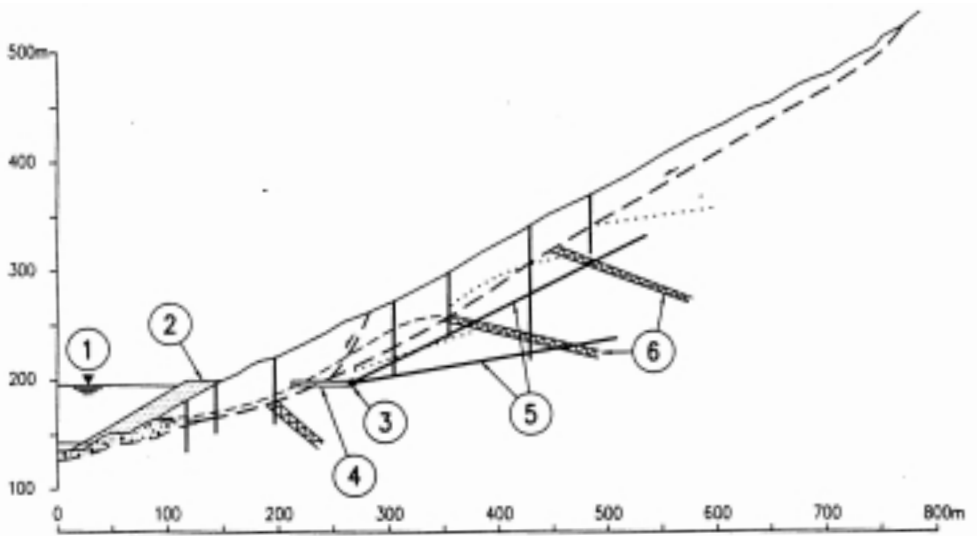
Brown, Gillon & Deere (1993) describe the overall approach and main elements of the stabilisation works undertaken on all potentially catastrophic landslides. The stabilisation measures implemented for the major landslides in the Cromwell Gorge are shown in Table A-4.1.

The objective was to offset the effects of lake filling on stability and preserve the creep behavior exhibited over the last 16 000 years, evidenced by the preservation of and lack of debris on terraces at the toe of the landslides. A fast-track stabilisation programme was implemented for the engineering works, based on tunnel layouts developed with the dual objectives of providing definitive information on the landslides and stabilisation by drainage.

Much of the drainage works involving underground tunnels was aimed at reducing and controlling sub-basal groundwater conditions to levels slightly above lake level. The investigations and piezometric response to the tunneling and drainage drilling confirmed the complex geological and hydrological conditions within and beneath some of the landslides. In some instances faults beneath the landslides compartmentalised groundwater systems with pressure differences of over 100 metres across the faults. Drainage into such compartments quickly reduced the high sub-basal pressures.

For two slides, drainage tunnels are below lake level. At Clyde Slide, gravity drainage occurs around the right abutment of the dam (Foster *et al*, 1997), and at Brewery Creek a pumped drainage system has been used (Gillon *et al*, 1992).

Buttressing was used for smaller slides and the toe lobes of larger slides where drainage works alone would not be fully effective. Fig. A-4.2 shows the buttressing and drainage works at Jackson Creek Slide. Preliminary excavation for the toe buttress at Jackson Creek increased movement rates on the frontal lobe from 15 mm/yr to 8 mm/day with only a small change in stability. Since completion of buttressing and drainage works, there has been no further movement of the frontal lobes at Jackson Creek landslide.



Cross Section at Jackson Creek Landslide
Coupe du glissement de terrain de Jackson Creek

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ① Lake Level ② Buttress ③ Drainage Adit ④ Branch Tunnel ⑤ Drain Holes ⑥ Faults | <ul style="list-style-type: none"> ① Niveau de la retenue ② Contrefort de butée ③ Galerie de drainage ④ Galerie ⑤ Trous de drainage ⑥ Failles |
|---|---|

Fig. A4-2

Cross section of Jackson Creek Slide showing stabilisation works
 (from Gillon *et al*, 1997)

Operational performance

Very small deformation responses attributable to lake filling occurred at four of the stabilised landslides. Slightly accelerated movement occurred at one slide that had not been stabilised and minor reactivation was detected at three others (Macfarlane & Gillon, 1996).

The most significant changes detected by operational monitoring have occurred as the result of rainstorms or prolonged wet periods. Responses have included small increases in movement rates lasting for a few weeks. There have also been rises in piezometric levels and drainage flows, particularly in some of the previously confined sub-basal aquifers. Reductions in piezometric levels and flows have been slow and in some cases have taken 12 to 18 months (eg. Macfarlane & Jenks, 1996). This data confirms earlier judgments that infiltration reaching the sub-basal aquifers had the potential to significantly de-stabilise a number of the landslides.

Table A-4.1

Characteristics and remedial measures of Clyde Power Project landslides

Slide	Physical characteristics				Stabilisation measures			
	Area (ha)	Volume m ³ x10 ⁶	Max. thick (m)	toe submerg (m)	Buttress (Mm ³)	Tunnel (km)	Drain holes (km)	Infiltr. protect (ha)
Clyde	120	60	50	28	1.3	1.0	2.1	–
Byford Creek	10	3	20	25	–	–	–	–
Jackson Creek	23	5	46	35	1.2	0.5	7.6	–
Hintons	16	5	50	35	0.5	–	1.3	–
Two Bridges	21	5	70	50	0.2	0.03	1.8	–
Dunlays	53	18	80	24	#	1.1	4.7	–
Flying Fox	14	3	50	32	#	–	1.1	–
No.5 Creek	126	60	100	40	0.2	0.8	6.3	–
Nine Mile DS	900	>1 000	160	40	–	4.2	12.8	–
Nine Mile US	260	240	150	40	1.4	3.1	16.2	–
Brewery Creek	149	80	160	40	2.5	3.2	15.6	–
Cairnmuir	67	20	85	nil	-	1.2	22.0	3.4
Cromwell	7.5	3	35	40	0.4	–	–	–
Cornish Point	22	4	30	35	–	–	–	–
Bannockburn	25*	1	20	25	–	–	–	–
Pipeclay Gully	28*	1	42	25	–	–	–	–
Ripponvale	300	120	50	8	–	–	–	–

* multiple small features # minor buttressing by highway fill

Key lessons

The Cromwell Gorge-Clyde Power Project shows that the lessons from Vaiont, Tablachaca, Downie and Dutchmans Ridge have been heeded by the geotechnical profession and responsible project owners. This case history has illustrated a number of important aspects of reservoir landslide behavior and management :

- old landslides with low activity can be extremely sensitive to minor load changes
- landslides can contain a number of separate lobes and have highly variable groundwater systems both within the slide and separately below the slide base

- with appropriate planning, the investigation phase can be linked to the stabilisation works, especially where investigation tunnels can be utilized for drainage within or beneath the landslide base
- within a comparatively uniform geological setting, landslides can display very different characteristics
- for the “ potentially catastrophic ” landslides that posed a high risk to the project, satisfactory performance has been achieved by offsetting the de-stabilizing effects of lake filling with remedial works. Relative factors of safety slightly in excess of 1.0 have resulted in no deformation, or in maintenance of very low creep rates
- for the “ non-catastrophic ” slides, satisfactory performance has been demonstrated using an observational approach. Relative factors of safety slightly less than 1.0 have resulted in increased creep rates at some slides
- a staged lake filling programme was essential to define the response of groundwater systems and the behavior of the slope model
- emergency preparedness planning and detailed monitoring, data evaluation and alarm management procedures were crucial to risk management for the project.

Regular monitoring and periodic safety reviews are continuing into the operational life of the reservoir.

References

BROWN, R. ; GILLON, M. ; DEERE, D. (1993). Landslide stabilisation at the Clyde Power Project. *ASCE Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Raleigh, North Carolina*, p. 299-319.

FOSTER, P.F. ; RIDDOLLS, B.W. ; MACFARLANE, D.F. (1996). Response of Clyde Slide, New Zealand, to toe inundation. *Proceedings Seventh International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 727-731.

GILLON, M.D. ; HANCOX, G.T. (1992). Cromwell Gorge Landslides - a general overview. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 83-102.

GILLON, M.D. ; MACFARLANE, D.F. ; FOSTER, P.F. (1997). Filling the landslide-affected Clyde Reservoir, New Zealand. *Proceedings 19th Congress ICOLD, Florence*, Q. 74, p. 163-182.

MACFARLANE, D.F. ; GILLON, M.D. (1996). The performance of landslide stabilisation measures, Clyde Power Project, New Zealand. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*, p. 1747-1757.

MACFARLANE, D.F. ; PATTLE, A.D. ; SALT, G. (1992). Nature and identification of Cromwell Gorge landslides groundwater systems. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch*, p. 509-518.

MACFARLANE, D.F. ; JENKS, D.G. (1996). Stabilisation and performance of No.5 Creek Slide, Clyde Power Project, New Zealand. *Proceedings 7th International Symposium on Landslides, Trondheim*. p. 1739-1746.

APPENDIX B - QUESTIONS TO ASK FOR DURING RESERVOIR LANDSLIDE INVESTIGATIONS

EXISTING LANDSLIDES

Question	Source of answer
geological setting regional local seismicity	published information, satellite and air photo interpretation, field mapping
geological controls on slope development and geometry faults sheared zones joint sets bedding/foliation	satellite and air photo interpretation, mapping, data evaluation
type of slope failure	air photo interpretation, mapping
rates and direction(s) of movement(s)	air photos, mapping, monitoring
past movement history	geological evidence, successive air photos, historical records, monitoring
current activity	field mapping, monitoring
boundaries, dimensions and volume	airphoto interpretation, mapping, calculation. Reliable volume calculation requires subsurface information
is the slide part of a larger one ?	air photo interpretation, field mapping
configuration and properties of the basal failure zone/plane	subsurface investigations, testing
configuration and properties of bounding surfaces or zones	mapping, subsurface investigations, testing
internal structures of the slide	subsurface investigations
relationships between slide limits (side, base) and parent rock mass	mapping, subsurface investigations
regional groundwater	mapping (springs, streams, geological controls), regional databases

Question	Source of answer
groundwater distribution and pressures within slide mass within parent rock mass	mapping, investigations drilling, piezometric monitoring
relationships between groundwater systems and structure slide mass parent rock mass	mapping, investigations drilling, piezometric monitoring, geological/hydrogeological models
effect of reservoir filling on groundwater system	piezometric monitoring, modelling
effect of reservoir operation on groundwater system	piezometric monitoring, modelling
presence of soluble or swelling rocks or soils	mapping, subsurface investigations, testing
presence of soils or rocks (or sheared zones within them) known to weaken on inundation	mapping, subsurface investigations, testing
slide mechanism	mapping, subsurface investigations, deformation monitoring, geological model
cause of movements	monitoring, geological precedent evidence
relationships between slide movement rate and rainfall/stream flows	monitoring
factors of safety (and assumptions) existing conditions seismic loading rainfall extreme flood reservoir filling reservoir operations rapid drawdown	field evidence, historical records, observation, analysis
allowances for extreme rainfall or seismic events	historical record, statistical information, precedent
probability of such events	historical record, statistical information
likely effects on slopes if not stabilised	hazard/risk assessment, analytical model
probabilities of failure of slope under these conditions	risk assessment
can it block the valley ?	compare cross sectional areas of slide and valley
consequences of failure of this mass	risk assessment
stabilisation options	depend on conditions, check suitability by analytical modelling

POTENTIAL FIRST-TIME LANDSLIDES

Question	Source of answer
geological setting regional local seismicity	published information, satellite and air photo interpretation, field mapping
geological controls on slope development and geometry faults sheared zones joint sets bedding/foliation	satellite and air photo interpretation, mapping, data evaluation
history of slope development	air photos, geomorphology
evidence of active or dormant slides nearby	air photos, mapping, geomorphology
is geological situation similar at nearby slides ?	air photos, mapping
are there active or dormant slides in similar geological, topographical and climatic environments elsewhere ?	literature search
regional groundwater	mapping (springs, streams, geological controls), regional databases
groundwater distribution and pressures within potential slide mass within parent rock mass	mapping, investigation drilling, piezometric monitoring
effect of rainfall/stream flows on groundwater pressures	piezometric monitoring
relationships between groundwater systems and rock structure	mapping, investigation drilling, piezometric monitoring, geological/hydrogeological models
effect of reservoir filling on groundwater system	piezometric monitoring, modeling
effect of reservoir operation on groundwater system	piezometric monitoring, modeling
presence of soluble or swelling rocks or soils	mapping, subsurface investigations, testing
presence of soils or rocks (or sheared zones within them) known to weaken on inundation	mapping, subsurface investigations, testing

Question	Source of answer
for rock slopes, does geological structure indicate kinematic stability ?	mapping, data evaluation, kinematic analysis
is there a feasible failure model ?	geological modeling, analysis
boundaries, dimensions, volume of potentially unstable mass	mapping, air photo interpretation, subsurface investigations
configuration and properties of potential basal and boundary failure surfaces	drilling, trenching, drives, testing
factors of safety (and assumptions) existing conditions seismic loading rainfall extreme flood reservoir filling reservoir operations rapid drawdown	
probability of extreme rainfall or seismic events	
likely effects on slopes if not stabilised	
probabilities of failure of slope under these conditions	
can it block the valley ?	compare cross sectional areas of slide and valley
consequences of failure of this mass	
stabilisation options	

APPENDIX C - CHECKLISTS FOR RESERVOIR LANDSLIDE INVESTIGATIONS

CHECK LIST FOR INVESTIGATIONS - EXISTING LANDSLIDES (after Stapledon, 1992)

geological setting regional local seismicity
geological controls on slope development and geometry faults sheared zones joint sets bedding/foliation
type of slope failure
rates and direction(s) of movement(s)
past movement history
current activity
boundaries, dimensions and volume
is the slide part of a larger one?
configuration and properties of the basal failure zone/plane
configuration and properties of bounding surfaces or zones
internal structures of the slide
relationships between slide limits (side, base) and parent rock mass
regional groundwater
groundwater distribution and pressures within slide mass within parent rock mass
effect of rainfall/stream flows on groundwater pressures
relationships between groundwater systems and structure slide mass parent rock mass
effect of reservoir filling on groundwater system
effect of reservoir operation on groundwater system
presence of soluble or swelling rocks or soils
presence of soils or rocks (or sheared zones within them) known to weaken on inundation
slide mechanism
cause of movements
relationships between slide movement rate and rainfall/stream flows

factors of safety (and assumptions) existing conditions seismic loading rainfall extreme flood reservoir filling reservoir operations rapid drawdown
allowances for extreme rainfall or seismic events
probability of such events
likely effects on slopes if not stabilised
probabilities of failure of slope under these conditions
consequences of failure of this mass
stabilisation options

CHECK LIST FOR INVESTIGATIONS - POTENTIAL LANDSLIDES

(after Stapledon, 1992)

geological setting regional local seismicity
geological controls on slope development and geometry faults sheared zones joint sets bedding/foliation
history of slope development
evidence of active or dormant slides nearby
is geological situation similar at nearby slides?
are there active or dormant slides in similar geological, topographical and climatic environments elsewhere ?
regional groundwater
groundwater distribution and pressures within slide mass within parent rock mass
effect of rainfall/stream flows on groundwater pressures
relationships between groundwater systems and rock structure
effect of reservoir filling on groundwater system
effect of reservoir operation on groundwater system
presence of soluble or swelling rocks or soils
presence of soils or rocks (or sheared zones within them) known to weaken on inundation
for rock slopes, does geological structure indicate kinematic stability ?
is there a feasible failure model ?
boundaries, dimensions, volume of potentially unstable mass
configuration and properties of potential basal and boundary failure surfaces
factors of safety (and assumptions) existing conditions seismic loading rainfall extreme flood reservoir filling reservoir operations rapid drawdown
probability of extreme rainfall or seismic events
likely effects on slopes if not stabilised
probabilities of failure of slope under these conditions
consequences of failure of this mass
stabilisation options

APPENDIX D – JAPANESE GUIDELINES FOR PRIORITISING RESERVOIR LANDSLIDE INVESTIGATIONS

The Japanese Institute of Construction Engineering (1995) has produced some simple charts to help set investigation priorities. By applying the results of a preliminary assessment of stability (Fig. D1), a priority rating (Fig. D2) is obtained. From this rating, the needs for landslide investigations (Fig. D3) are determined. This is included as an example of a prioritization system.

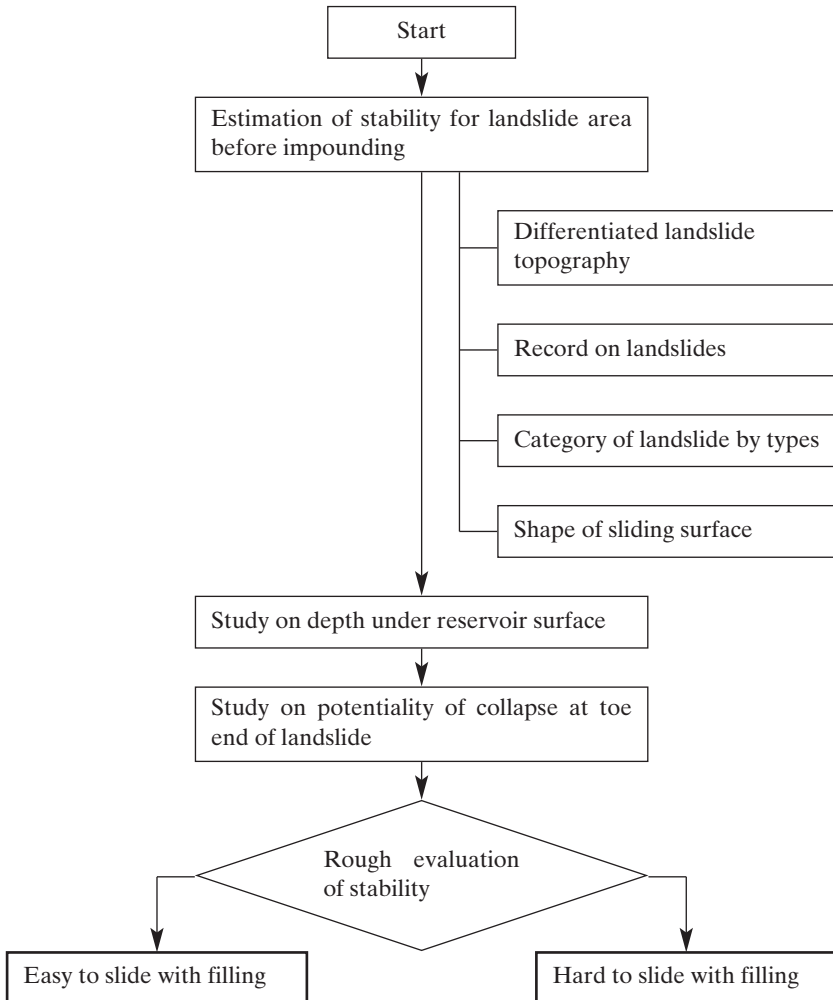


Fig. D.1

Flow chart for reviewing the stability of a reservoir landslide area for the purpose of prioritizing investigations

	Protected Objects	Reservoir slope near dam	Facilities around reservoir	Other slopes around reservoir
Preliminary Assessment of lake effect	Landslide Scale	Large ↔ Small	Large ↔ Small	Large ↔ Small
Easy to destabilise		A ↔ A ↓	A/B ↔ B/C ↓	B ↔ B/C ↓
Hard to destabilise		B ↔ B	B/C ↔ C/D	C ↔ D

Fig. D.2

A priority rating for investigation based on preliminary assessment of landslides affected by impounding (after Japanese Institute of Construction Engineering, 1995)

Priority A : detailed investigations are essential

Priority D : investigations not normally considered necessary

Priority Rating	A	B	C	D
Protected Objects				
Reservoir slope near dam	Should a landslide occur, it would affect the dam. Investigations are essential.	Investigation must be implemented	-	-
Facilities around reservoir	A landslide may affect facilities around the reservoir and the overall dam construction plan. Investigations are essential.	Precise investigation is required, along with studies about relocation of facilities	Investigation if and when necessary	Generally no investigations required
Other reservoir slopes	-	Investigations required	Investigation if and when necessary	Generally no investigations required

Fig. D.3

Priorities for landslide investigations

(after Japanese Institute of Construction Engineering, 1995)

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : Juin 2002
N° 21728
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>