

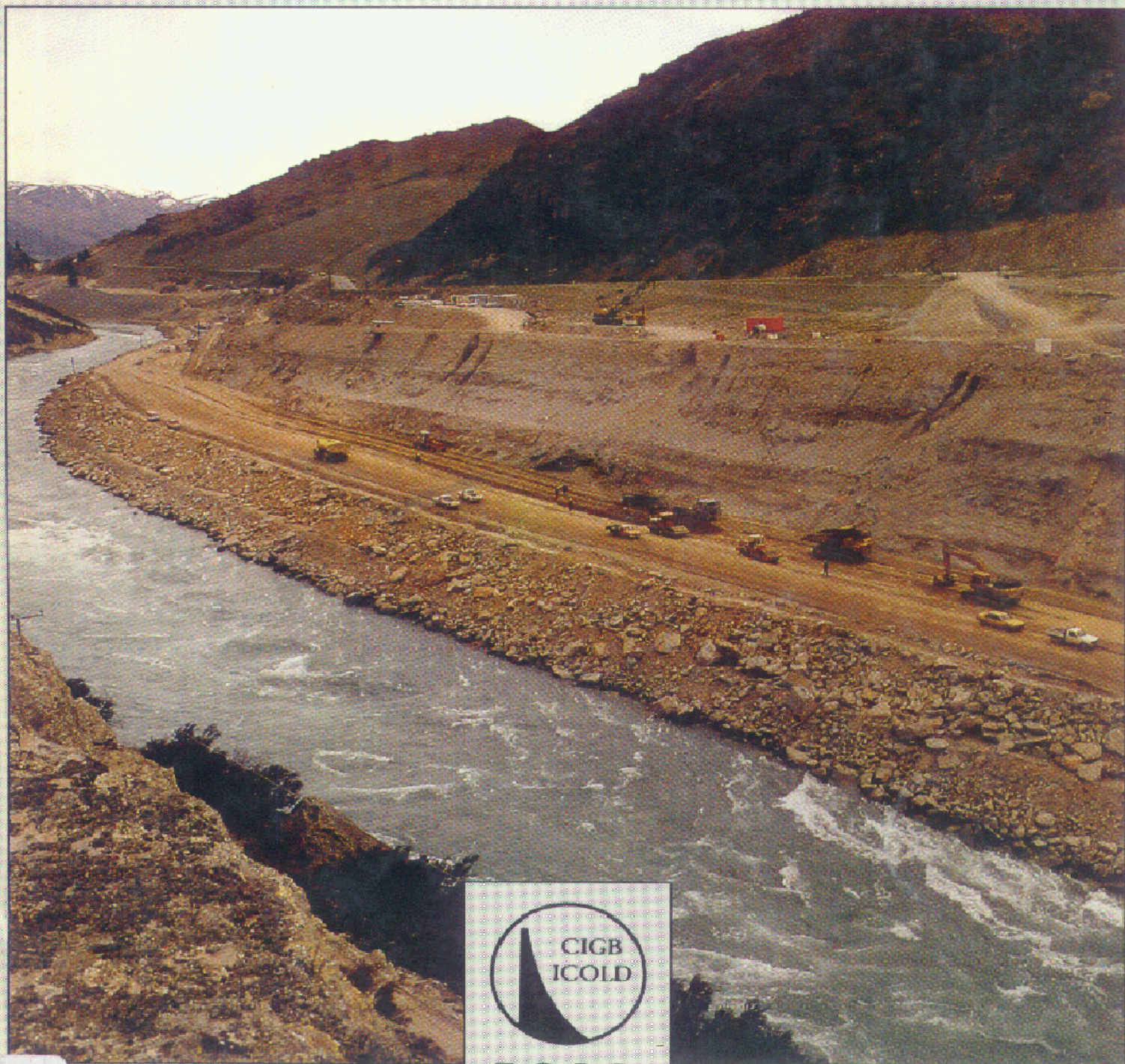
# DAMS AND ENVIRONMENT

*Geophysical impacts*

# BARRAGES ET ENVIRONNEMENT

*Effets géophysiques*

**Bulletin 90**



**1993**



The cover illustration is reproduced from Photo 6 (page 39).  
Stabilization works for Brewery Creek landslide, New Zealand.

*L'illustration de couverture reproduit la Photo 6 du Bulletin (page 39).  
Travaux de stabilisation du glissement de terrain Brewery Creek, Nouvelle-Zélande.*

This Bulletin has been prepared by the Sub-Committee on Geophysics  
of the Committee on the Environment.

Original text in English – French translation by Y. Le May.

*Ce Bulletin a été préparé par le Sous-Comité des Effets Géophysiques  
du Comité de l'Environnement.*

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

# **DAMS AND ENVIRONMENT**

---

*Geophysical impacts*

# **BARRAGES ET ENVIRONNEMENT**

---

*Effets géophysiques*

---

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris  
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

---

**AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:**

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

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

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

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

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

**NOTICE – DISCLAIMER :**

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON THE ENVIRONMENT  
COMITÉ DE L'ENVIRONNEMENT  
(1985-1991)

Chairman/Président Great Britain/Grande-Bretagne	E. T. HAWS
Members/Membres	
Brazil/Brésil	J. A. BANDEIRA DE MELLO
Canada	G. GUERTIN
China/Chine	ZHANG ZEZHEN
Finland/Finlande	T. KOVANEN
France	P. SAVEY
Indonesia/Indonésie	M. UMAR
Italy/Italie	C. LOTTI (1) G. CESARI (2)
Japan/Japon	T. KANEYASHIKI (**)
Malaysia/Malaisie	DATO' MOHD JALALUDDIN
Netherlands/Pays-Bas	H. ENGEL (*)
New Zealand/Nlle-Zélande	E. HEINE
Pakistan	A. R. JAVAID (3)
Portugal	A. GONÇALVES
Spain/Espagne	J. FORA BECEDONIZ
Sri Lanka	W. M. S. C. PIYADASA
Sweden/Suède	Bo. STEN (**)
Switzerland/Suisse	N. SCHNITTER
USA/États-Unis	J. W. MORRIS
USSR/URSS	L. P. MIKHAILOV
Venezuela	L. CASTRO
Co-opted member/Membre coopté	L. O. TIMBLIN (USA)

(\*) Chairman/Président } Sub-Committee on Geophysics.  
(\*\*) Member/ Membre } Sous-Comité des Effets Géophysiques.

(1) Member until 1990/Membre jusqu'en 1990.

(2) Member since 1990/Membre depuis 1990.

(3) Member since 1989/Membre depuis 1989.

---

## SOMMAIRE

---

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
  2. DÉFRICHEMENT ET DRAINAGE DE LA ZONE DE RETENUE
  3. STABILITÉ DES VERSANTS
  4. CHANGEMENTS DU RÉGIME DE LA RIVIÈRE ET DES TRANSPORTS SOLIDES
  5. SÉISMICITÉ INDUITE
  6. RÉFÉRENCES

---

## CONTENTS

---

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
  2. RECLAMATION AND DRAINAGE
  3. SLOPE STABILITY
  4. CHANGES IN WATERFLOW AND SEDIMENT TRANSPORT
  5. INDUCED SEISMICITY
  6. REFERENCES

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

AVANT-PROPOS .....	8
1. INTRODUCTION .....	10
1.1. But du rapport et domaine traité .....	10
1.2. Prise de décision et participation du public .....	10
2. DÉFRICHEMENT ET DRAINAGE DE LA ZONE DE RETENUE .....	14
2.1. Défrichage de la zone de retenue .....	14
2.2. Nappe phréatique .....	20
3. STABILITÉ DES VERSANTS .....	22
3.1. Retenues .....	22
3.1.1. Protection des rives de la retenue .....	22
3.1.2. Glissements de terrain .....	26
3.2. Protection des rives dans les estuaires avec fermeture totale ou partielle ...	38
3.2.1. Estuaires avec fermeture totale .....	40
3.2.2. Estuaire avec fermeture partielle .....	48
3.2.3. Conclusions et évaluation .....	52
4. CHANGEMENTS DU RÉGIME DE LA RIVIÈRE ET DES TRANSPORTS SOLIDES .....	54
4.1. Retenues .....	54
4.2. Estuaires fermés .....	58
5. SÉISMICITÉ INDUITE .....	62
5.1. Mouvements élastiques et élasto-plastiques à long terme .....	62
5.2. Séismes induits .....	62
5.2.1. Catégories de phénomènes sismiques .....	64
5.2.2. Théories des séismes induits .....	64
5.2.3. Occurrence des séismes induits .....	66
5.2.4. Mesures de surveillance .....	66
5.2.5. Recherches nécessaires .....	68
6. RÉFÉRENCES .....	72

---

## TABLE OF CONTENTS

---

FOREWORD .....	9
1. INTRODUCTION .....	11
1.1. Report objectives and scope .....	11
1.2. Decisionmaking processes and public involvement .....	11
2. RECLAMATION AND DRAINAGE .....	15
2.1. Clearing of dammed areas .....	15
2.2. Groundwater .....	21
3. SLOPE STABILITY .....	23
3.1. Reservoirs .....	23
3.1.1. Reservoir shoreline protection .....	23
3.1.2. Landslides .....	27
3.2. Shoreline protection in dammed-up and partially dammed-up estuaries .....	39
3.2.1. Dammed-up estuaries .....	41
3.2.2. A partially dammed-up estuary .....	49
3.2.3. Conclusions and evaluation .....	53
4. CHANGES IN WATERFLOW AND SEDIMENT TRANSPORT .....	55
4.1. Reservoirs .....	55
4.2. Dammed-up estuaries .....	59
5. INDUCED SEISMICITY .....	63
5.1. Elastic and elasto-plastic long-term movements .....	63
5.2. Induced earthquakes .....	63
5.2.1. Categories of earthquake phenomena .....	65
5.2.2. Theories on induced earthquakes.....	65
5.2.3. Occurrence of induced earthquakes .....	67
5.2.4. Measures by the construction engineer .....	67
5.2.5. Necessary research .....	69
6. REFERENCES .....	72



---

## LISTE DES FIGURES ET PHOTOGRAPHIES

---

- Fig. 1. – Ouvrages de stabilisation du glissement de terrain Jackson Creek (Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande).
- Fig. 2. – Ouvrages de stabilisation du glissement de terrain Brewery Creek (Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande).
- Fig. 3. – Le Plan Delta dans le sud-ouest des Pays-Bas.
- Fig. 4. – Carte indiquant la situation des sismographes du réseau de surveillance des micro-séismes de Pukaki (Nouvelle-Zélande).
- Photo 1 . – Défrichage de la zone de la retenue Suorva, en Suède.
- Photo 2 . – Incinérateur sur barge pour brûler les débris de bois flottants provenant de la retenue Opinaca, au Canada.
- Photo 3 . – Aménagement paysager de sites affectés par des travaux de construction. Complexe La Grande, au Canada.
- Photo 4 . – Protection contre l'érosion (Suède).
- Photo 5 . – Vue aérienne de la Gorge Supérieure Cromwell (Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande) montrant quelques-uns des principaux glissements de terrain.
- Photo 6 . – Construction d'un tapis de faible perméabilité au pied du glissement de terrain Brewery Creek (Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande).
- Photo 7 . – Ouvrage de protection au large constitué de digues en moellons bruts, dans le Haringvliet (Pays-Bas).
- Photo 8 . – Ouvrage de protection au large, dans le lac Grevelingen (Pays-Bas), au cours d'une tempête.
- Photo 9 . – Photo aérienne des ouvrages de protection au large, dans le Haringvliet (Pays-Bas), en hiver.
- Photo 10. – Formation de bancs de sable parallèles à la côte, au large des estuaires hollandais. Banc de sable devant le barrage Veerse.

---

## LIST OF FIGURES AND PHOTOGRAPHS

---

- Fig. 1. – Stabilisation works for Jackson Creek Landslide (Clyde Power Project, New Zealand).
- Fig. 2. – Stabilisation works for Brewery Creek Landslide (Clyde Power Project, New Zealand).
- Fig. 3. – The Delta Project in the south western part of the Netherlands.
- Fig. 4. – Locality map showing seismograph stations of the Pukaki microearthquake network (New Zealand).
- Photo 1 . – Clearing the Suorva reservoir in Sweden.
- Photo 2 . – Incinerator barge for burning floating wood debris from the Opinaca reservoir in Canada.
- Photo 3 . – Landscaping of sites affected by construction. The La Grande Complex in Canada.
- Photo 4 . – Erosion control measures (Sweden).
- Photo 5 . – Aerial view of the Upper Cromwell Gorge (Clyde Power Project, New Zealand) showing some of the major landslides.
- Photo 6 . – Construction of low permeability blanket adjacent to the toe of the Brewery Creek Landslide (Clyde Power Project, New Zealand).
- Photo 7 . – Offshore protection structure in the form of rubble dams in the Haringvliet (Netherlands).
- Photo 8 . – Offshore protection structure in Lake Grevelingen (Netherlands) in function during storm conditions.
- Photo 9 . – Aerial view of offshore protection structures in the Haringvliet (Netherlands) during winter.
- Photo 10. – Developing sand banks parallel to the coast seaward of the Dutch estuaries. Sand bank in front of Veerse Dam.

---

## AVANT-PROPOS

---

Le Comité de l'Environnement de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) a déjà publié six Bulletins (nos 35, 37, 50, 65, 66 et 86) (\*). Le premier est en grande partie technique; le second est destiné à l'information du grand public; le troisième analyse les expériences d'ingénieurs confrontés aux problèmes d'impact des barrages sur l'environnement dans les grandes régions climatiques du monde; le quatrième présente cinq exemples vécus; le cinquième décrit en détail l'expérience acquise aux Pays-Bas sur l'aménagement du Zuiderzee; le sixième traite des effets socio-économiques associés à la construction des grands barrages.

Le présent Bulletin donne une synthèse des divers problèmes géophysiques qui peuvent se présenter avant, pendant et après la construction d'un grand barrage. Il s'appuie, entre autres, sur un certain nombre de rapports présentés pour la Question 60 au 16<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages (San Francisco, 1988): « Retenues et Environnement – Expérience de gestion et de mesure d'impact », et pour la Question 64 au 17<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages (Vienne, 1991): « Les barrages et l'environnement ». Ces rapports et d'autres documents cités dans la liste figurant à la fin du Bulletin peuvent être utilement consultés comme exemples spécifiques de problèmes et de solutions, le présent document ayant un caractère général.

E. T. Haws  
Président du Comité  
de l'Environnement

*Si l'on veut disposer d'un aide-mémoire et d'une approche méthodologique pour les études d'impact sur l'environnement, il est recommandé d'utiliser la matrice contenue dans le Bulletin 35; cette matrice peut être obtenue sans le Bulletin, par 10 exemplaires.*

---

(\*) La liste de ces six Bulletins figure au chapitre 6, Références.

---

---

## FOREWORD

---

The Committee on the Environment of the International Commission on Large Dams (ICOLD) has previously published six Bulletins (35, 37, 50, 65, 66 and 86) (\*). The first was largely of a technical nature, and the second for the better information of the general public; the third distilled the experiences of engineers involved with dam projects located in broadly defined climatic regions of the world; the fourth gave five case histories; the fifth describes in detail the experience with the Zuiderzee project, in the Netherlands; the sixth gives an overview of social and economic problems related to the construction of a large dam.

The present Bulletin gives an overview of geophysical problems which may arise before, during or after the construction of a large dam. Among its sources it draws on a number of reports submitted to the 16th ICOLD Congress in San Francisco, in 1988, in response to Question 60: Reservoirs and the Environment – Experience in management and monitoring, and to further such reports submitted to the 17th ICOLD Congress in Vienna, 1991, in response to Question 64: Environmental Issues in Dam Projects. The relevant reports and other listed references may be accessed for specific instances of problems and solutions, as the text of the Bulletin is general in nature.

E. T. Haws  
Chairman,  
Committee on the Environment

*For a comprehensive aide memoire and methodology approach for environmental impact studies, the matrix of Bulletin 35 is recommended, and it may be noted that the matrix is available in batches as a separate set.*

---

(\*). *The list of these six Bulletins is given in chapter 6, References.*

---



---

# 1. INTRODUCTION

---

## 1.1. BUT DU RAPPORT ET DOMAINE TRAITÉ

La construction de barrages et la création de retenues peuvent avoir des effets importants sur l'environnement. Ces effets peuvent être à court terme et à long terme, et s'étendre bien au-delà des limites physiques de l'aménagement.

Divers mini-rapports traitant des effets dans les domaines suivants : socio-économie (\*), géophysique, qualité de l'eau, flore et faune, ont été préparés (ou sont en cours de préparation).

Le présent mini-rapport porte sur les effets géophysiques pouvant résulter de la construction de barrages et de la création de retenues, et indique les mesures susceptibles d'être mises en œuvre au cours de la construction et de l'exploitation afin de réduire ou atténuer les effets nuisibles des ouvrages. Les sujets géophysiques particuliers traités dans le rapport comprennent :

- Défrichement et drainage de la zone de retenue.
- Stabilité des versants.
- Régime de la rivière et transports solides.
- Séismicité.

Le but du rapport est d'attirer l'attention des promoteurs, des maîtres d'œuvre, des organismes de financement, des maîtres d'ouvrage et du grand public sur les effets géophysiques résultant de travaux d'aménagement. Cela devrait encourager l'identification, suffisamment tôt, des effets géophysiques importants, l'intervention de spécialistes en vue d'étudier ces effets, et l'adoption de mesures appropriées.

## 1.2. PRISE DE DÉCISION ET PARTICIPATION DU PUBLIC

Les effets des aménagements hydrauliques, de même que les mesures prises pour prévenir ou atténuer ces effets, peuvent concerner la zone avoisinante, les habitants et leurs activités dans la zone. Aussi, au cours de l'examen des problèmes et lors de la prise de décision, les personnes susceptibles d'être affectées doivent-elles intervenir et les aspects écologiques être pris en compte.

Aux États-Unis, au cours des 40 dernières années, et principalement depuis 1969 où la Loi sur la politique en matière d'environnement (National Environ-

---

(\*) *Bulletin CIGB n° 86 : Barrages et environnement, Effets socio-économiques. Les Bulletins traitant des effets sur la qualité de l'eau, et sur la flore et la faune sont en cours de préparation.*

---

---

# 1. INTRODUCTION

---

## 1.1. REPORT OBJECTIVES AND SCOPE

The construction of dams and the formation of reservoirs can significantly affect existing environmental and social values. The effects can be both short and long-term, and can extend well beyond the physical project boundary.

A series of mini-reports has been prepared (or are in preparation) drawing attention to effects in the fields of socio-economics (\*), geophysics, water quality and flora and fauna.

This particular mini-report has been prepared to address geophysical processes that can be affected by development. It summarises the principal geophysical impacts that can accompany the construction of dams and formation of reservoirs, and outlines measures which can be implemented during construction and operation to minimise or mitigate any adverse project effects. Specific geophysical processes which are addressed in the report include :

- Reclamation and drainage.
- Slope stability.
- Water flow and sediment transport.
- Seismicity.

It is intended that the report provides project promoters, engineers, funding agencies, owners and the general public with an awareness of geophysical impacts that can accompany development. Such an awareness should encourage the early identification of significant geophysical impacts, the enlistment of specialist support to address impacts and the adoption of appropriate solutions.

## 1.2. DECISIONMAKING PROCESSES AND PUBLIC INVOLVEMENT

Impacts of water resource projects, as well as measures taken to prevent or mitigate these impacts, can greatly influence the surrounding area, the inhabitants, and their use of the area. Therefore, in decision and policy making processes, those likely to be affected should be involved, and environmental consideration should be integrated.

In the United States of America over the past 40 years, and especially since 1969 when the National Environmental Policy Act (NEPA) was passed by the

---

*(\*) ICOLD Bulletin 86 : Dams and Environment, Socio-economic Impacts. The Bulletins on water quality and on flora and fauna are in preparation.*

---

mental Policy Act - NEPA) fut votée par le Congrès, la participation du public dans le processus de prise de décision a été appréciée. Il s'est avéré que les ingénieurs, les hommes de loi ou les promoteurs les plus qualifiés, qui prenaient la responsabilité d'indiquer au public ce dont il avait besoin, se trouvèrent bientôt dans la position de demander plutôt que d'indiquer. En fait, la « transparence » est devenue d'usage courant et il en est résulté que les personnes concernées par un projet d'aménagement sont entendues et participent au processus de prise de décision.

La seconde idée qui s'est avérée très précieuse dans l'amélioration des positions technique/politique a consisté à prendre en compte les problèmes d'environnement tout au long du processus de prise de décision. Cette méthode présente une nette amélioration par rapport à celle où l'étude d'impact porte sur une décision déjà prise.

Les paragraphes 3.2.1 et 3.2.2 décrivent la politique et l'organisation générale mises en œuvre aux Pays-Bas lors de la prise de décision concernant les mesures de protection côtière associées à la fermeture d'estuaires (\*).

---

(\*) *Réf. Water Power Mag. 1991 for international synthesis.*

Congress, the value of public involvement in decision making processes has been learned. It was found that the best intended and qualified engineers, lawyers or project promoters who presumed responsibility of telling the public what the public needed were soon in the position of asking rather than telling. In fact, the so-called "fishbowl planning" technique has become commonplace, and as a consequence, the individuals to be affected by a project are heard and actually have a hand in the decisionmaking process.

The second idea which proved most valuable in improving the engineer/policymaker position was to integrate environmental considerations at every point from the beginning to the end of the decisionmaking process. This approach is an improvement over a commonly used environmental review of an already made decision.

In paragraph 3.2.1 and 3.2.2, a general management strategy and policy analysis method used in the Netherlands in decisionmaking on shoreline protection measures in dammed-up estuaries is described (\*).

---

(\*) *Ref. Water Power Mag. 1991 for international synthesis.*

---



---

## 2. DÉFRICHEMENT ET DRAINAGE DE LA ZONE DE RETENUE

---

### 2.1. DÉFRICHEMENT DE LA ZONE DE RETENUE

La création de réservoirs régulateurs conduit à la submersion de très vastes zones. Le déboisement et le débroussaillage, de manière générale ou sélective, des zones inondées devront être examinés avec soin afin d'éviter des problèmes au cours de l'exploitation des retenues.



#### – Stratégie de défrichement

Il importe de mettre au point une bonne stratégie de défrichement permettant de répondre aux principales exigences du projet, mais donnant également l'occasion de tirer tous autres avantages. Les aspects à prendre en compte dans un tel programme de défrichement à buts multiples sont : utilisation de la retenue, qualité de l'eau, vie aquatique, érosion et aspect esthétique du paysage, exploitation des ressources et mise en dépôt des détritux.

---

## 2. RECLAMATION AND DRAINAGE

---

### 2.1. CLEARING OF DAMMED AREAS

In creating regulated lakes or reservoirs, extensive areas are covered by water. Clearing the area that will be inundated of trees and brush on a selective or general basis should be considered carefully with the aim of avoiding problems in future use of the reservoir.

Photo 1

Clearing the Suorva reservoir in Sweden.  
*Défrichement de la zone de la retenue Suorva, en Suède.*

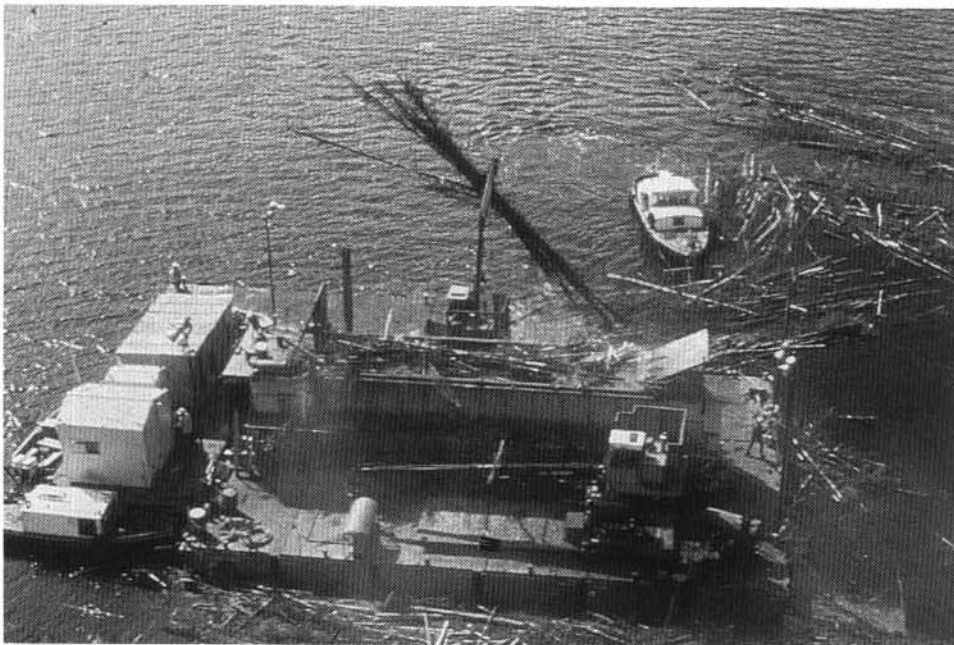
#### – Clearing strategy

It is considered necessary to develop a good clearing strategy that meets the primary project needs but also provides adequate opportunities for all secondary interests. Aspects to be considered in such a multiple-use clearing plan are future reservoir use, water quality, aquatic life, erosion and landscape aesthetics, resource utilization, and waste disposal.

#### **- Utilisation de la retenue**

Si la zone de retenue n'est pas défrichée, des broussailles et arbres morts immergés, des troncs flottants, des souches et autres bois peuvent entraver les activités de pêche et de loisirs dans la retenue, et devenir un danger pour les grilles et les vannes.

L'entretien des zones défrichées est également important; par exemple, les souches faisant surface devront être enlevées. Des îles de tourbe ou de ponce peuvent également flotter et être préjudiciables aux activités humaines, aux grilles et vannes.



#### **- Qualité de l'eau**

La stratégie de défrichement de la retenue a parfois des effets importants sur la qualité de l'eau si la zone submergée est grande par rapport au volume d'écoulement annuel. Ce sujet est traité en détail dans le mini-rapport sur la Qualité de l'eau et le Climat.

#### **- Érosion**

Les rives défrichées sont sujettes à une érosion plus grande et plus rapide que celles submergées avec la végétation restée en place.

S'il est décidé de défricher les nouvelles rives, on devra prendre des mesures de protection contre l'érosion, si cela est souhaitable ou nécessaire. Des plantations

**– Reservoir use**

If the reservoir area is not cleared, dead trees and brush standing in the water and floating trunks, stumps, and other woody materials may hamper fishery and recreational activities in the reservoir and may become a danger to screens and gates.

Maintenance of cleared areas is also of importance, e.g., stumps will surface and must be removed. Islands of peat or pumice can also float to the surface, where they become a danger to human activities, screens, and gates.

Photo 2

Incinerator barge for burning floating wood debris from the Opinaca reservoir in Canada.

The area has been partially deforested making use of the ice in winter.

The trees have been broken by the weight of the ice welded to the trunks as the water level drops during the winter.

*Incinérateur sur barge pour brûler les débris de bois flottants provenant de la retenue Opinaca, au Canada. La zone a été déboisée en partie en utilisant la glace en hiver. Les arbres ont été rompus par le poids de la glace fixée aux troncs, le niveau de retenue baissant au cours de l'hiver.*

**– Water quality**

The water quality can be heavily influenced by the reservoir clearance policy if the area flooded is large compared with the annual volume of water passed. The subject is dealt with at length in the mini report on Water Quality and Climate.

**– Erosion**

Cleared shorelines are subjected to greater and more rapid erosion than areas with inundated vegetation.

When it is decided to clear the new shoreline area, it should be protected against erosion where regarded desirable or necessary. Plant life should be



devront être prévues tout près des rives défrichées en vue d'éviter des érosions. Certaines espèces supportant des immersions périodiques (par exemple, le « *Paspalum vaginatum* ») peuvent être plantées dans la zone de marnage.

#### - Paysage

Du point de vue esthétique, on peut se demander si les arbres morts, souvent utilisés comme perchoirs et lieux de nidification par les oiseaux, perturbent l'aspect paysager de la retenue. Lorsqu'il y a de vastes zones peu profondes près du niveau supérieur de la retenue, l'enlèvement de la végétation peut conduire à un paysage généralement sans attraits, présentant des surfaces étendues d'îlots et de hauts-fonds dénudés, avec parfois des tourbières et des souches restées en place, ce qui donne un aspect déplaisant.

Un remodelage modéré du paysage est susceptible d'améliorer les conditions et de rendre le paysage plus attrayant. Cela prend de l'importance dans les zones touristiques.

Des bosquets peuvent être spécialement préservés ou plantés pour améliorer le paysage ou cacher les rives d'aspect inesthétique vues depuis des zones habitées ou des routes principales. Ces plantations servent parfois, également, de protection contre le vent. Des zones d'appontement et des lieux de baignade peuvent être aménagés et s'intégrer dans le paysage de la retenue.



promoted close to the cleared shoreline to avoid erosion. Certain species tolerant to periodic inundation (like *Paspalum vaginatum*) may be planted in the drawdown zone.

– **Landscape**

From a visual point of view, it is debatable whether or not the dead trees, often used as perching and nesting sites by birds, are disturbing elements in the reservoir landscape. When there are extensive shallow areas close to the upper storage level, the clearing of vegetation may result in generally considered non-attractive landscapes with vast surfaces of bare islands and shoals, sometimes with remnants of peat bogs and stumps contributing to the unpleasant impression.

A moderate remodelling of the landscape may improve the conditions and may make the landscape much more attractive. This may be important in sightseeing areas.

Groups of trees may be specially preserved or planted to improve the scenery or to hide unpleasant shore areas as seen from inhabited areas or from main roads. They may also be planted as protection against the wind. Landing-stages and bathing places may be constructed and fitted into the reservoir landscape.

Photo 3

Landscaping of sites affected by construction. At the La Grande Complex in Canada more than 10 million young trees and shrubs were planted at sites affected by construction.

*Aménagement paysager de sites affectés par des travaux de construction. Au Complexe La Grande, au Canada, plus de 10 millions de jeunes arbres et arbustes ont été plantés sur les sites affectés par les travaux.*

### **– Stratégie de défrichement mise en œuvre**

En pratique, seule une partie de la zone de retenue sera défrichée. Le défrichement peut être sélectif, suivant la profondeur, l'utilisation de la retenue, les zones de vie aquatique, la qualité de l'eau et les coûts.

## **2.2. NAPPE PHRÉATIQUE**

Le niveau de la nappe phréatique locale varie généralement avec le niveau de la retenue. L'amplitude des variations de niveau de la nappe phréatique dépend de la distance par rapport aux rives de la retenue, de la perméabilité du sol et des caractéristiques de la nappe phréatique régionale. Les niveaux supérieurs de retenue et un faible drainage provoquent des terrains marécageux au voisinage. La baisse du niveau de retenue peut entraîner le tarissement de puits et des résurgences sur les versants avec des risques de glissement ou d'érosion. Les variations de la nappe phréatique ont parfois des effets sur les productions agricole et sylvicole, en particulier lorsque les sols sont perméables.

Des tassements et des dégâts surviennent parfois sur des édifices avoisinants, lors du remplissage et/ou de la baisse de la retenue, principalement dans le cas de sols sédimentaires à grains fins. La végétation peut être affectée, de même que la qualité de l'eau dans les puits (par exemple, teneur plus élevée en fer et en manganèse). Les zones susceptibles d'être touchées seront maintenues sous étroite surveillance et des mesures seront prises pour garantir, entre autres, une fourniture d'eau sans danger.

Les réseaux d'irrigation influent parfois sur la salinité de l'eau de la nappe, et une irrigation continue dans des régions au climat sec peut conduire à une salinité des sols, si ceux-ci ne sont pas convenablement lessivés et drainés. Cela se produit lorsqu'il n'est pas prévu, lors de la détermination de la fourniture d'eau nécessaire, une part suffisante pour un tel lessivage. Un excès d'eau douce permet de chasser les sels en dehors des terres irrigables.

**– Clearing strategy in practice**

In practice only part of the reservoir area will be cleared. The clearing can be selective, considering depth, future use, aquatic life habitats, water quality, and costs.

**2.2. GROUNDWATER**

The local groundwater level is likely to vary with the water level in the reservoir. The amplitude of the groundwater-level variations decreases with distance from the shoreline, soil permeability, and the regional groundwater characteristics. High water levels in the reservoir and poor drainage produce swampy ground in the neighbourhood. Lowering of the water level may cause wells to run dry and seepage out of banks to occur with ensuing slumping or erosion effects. The changing groundwater conditions may affect agriculture and forest production, particularly on permeable soils.

Settlement and damage of adjacent buildings sometimes occur, upon impounding and/or drawdown, especially in fine-grained sediment soils. Vegetation can be affected and also the water quality in wells, for instance a higher content of iron and manganese. Areas where problems may occur should be kept under close observation, and measures should be taken to ensure, among other things, a safe water supply.

Irrigation systems can influence the salinity of the groundwater, and continuous irrigation in dry climates can lead to salinity of the soils, if not adequately flushed and drained. This occurs when an adequate leaching component is not included in determining the needed water supply. When excess fresh water is available, it can be used to flush salts out of otherwise irrigable lands.

---

## 3. STABILITÉ DES VERSANTS

---

### 3.1. RETENUES

L'érosion des rives des retenues se produit normalement dans toute la zone située entre le niveau normal de retenue et le niveau minimal d'exploitation. L'érosion peut résulter de l'action des vagues dues au vent et aux activités nautiques; des glissements et des affaissements surviennent parfois par suite d'une diminution de stabilité des pentes lors d'une vidange; il faut également signaler l'érosion induite par les écoulements souterrains, et le creusement des lits des affluents lors des niveaux bas de retenue. Les caractéristiques de ces phénomènes dépendent des conditions locales et de l'exploitation de la retenue. L'intensité de l'érosion est fonction de l'exposition des rives, de la vitesse et de la durée du vent, du fetch, de la configuration des courants, du marnage de la retenue, de la végétation, etc. La glace est souvent un agent actif, en poussant des blocs et des éléments plus petits sous forme de cordons en de nombreux endroits autour du réservoir. Lorsque le marnage de la retenue est de grande amplitude, de vastes zones peuvent être exposées à l'érosion. Une érosion intense peut se manifester sur plusieurs décennies, puis diminuer progressivement. Parfois, une stabilisation est atteinte relativement tôt, en particulier lorsque les matériaux des rives contiennent beaucoup de blocs et de pierres. Souvent, des terrasses se forment sur les rives par suite du maintien prolongé de la retenue à certains niveaux, accompagné de l'effet des vagues dues au vent; parfois, des dunes de sable éolien se créent au-dessus de la ligne d'eau du fait de la disparition de la végétation dans la zone temporairement submergée.

L'érosion des rives des lacs artificiels est susceptible d'endommager des bâtiments, des routes, des ponts, etc. Souvent, les effets indirects sont moins spectaculaires, mais plus importants; c'est ainsi que la production de sédiments affecte la qualité de l'eau, les conditions du fond de la retenue et la vie biologique dans le réservoir. Des dépôts de sédiments peuvent se produire, une végétation luxuriante prenant naissance le long des berges de la rivière et dans le lit majeur.

Dans certains cas, l'érosion des rives est considérée comme l'un des effets les plus nuisibles sur l'environnement. Des mesures prises pour réduire ce phénomène peuvent avoir des effets bénéfiques d'ordre économique et écologique.

#### 3.1.1. Protection des rives de la retenue

Des travaux de protection de rives sont toujours réalisés lorsque des ponts, routes, bâtiments et tous autres ouvrages de grande valeur économique sont susceptibles d'être endommagés par l'érosion. A d'autres endroits, il peut être nécessaire de protéger les rives pour réduire l'érosion, préserver des terres de valeur, prévenir l'augmentation de la turbidité de l'eau et des transports solides, et préserver la beauté du paysage.

---

## 3. SLOPE STABILITY

---

### 3.1. RESERVOIRS

Shoreline erosion in reservoirs normally occurs within the whole interval between upper storage level and drawdown level. The erosional processes are wave erosion due to wind effects and waves from boating activities, slides and slumps caused by reduced slope stability due to drawdown, erosion induced by groundwater seepage, and degradation in stream tributaries at drawdown levels. The character of these processes depends upon local conditions and reservoir operation. The erosional intensity is a function of shore exposure, wind velocity and duration, free fetch, current patterns, water-level fluctuations, vegetation, etc. Ice is often an active agent in the process, pushing boulders and finer material into ridges at many places around the reservoir. Where variations in water level are large, wide areas may be influenced by the erosional processes. Intensive erosion often goes on for several decades and then gradually slows down. Sometimes the stabilized level is reached earlier, especially when stones and boulders are abundant in the bank material. Often terraced banks or shores result due to prolonged constant water stages with accompanying wind wave effects, and sometimes wind-blown sand dunes are created above the waterline due to vegetation die-off in the temporarily submerged zone.

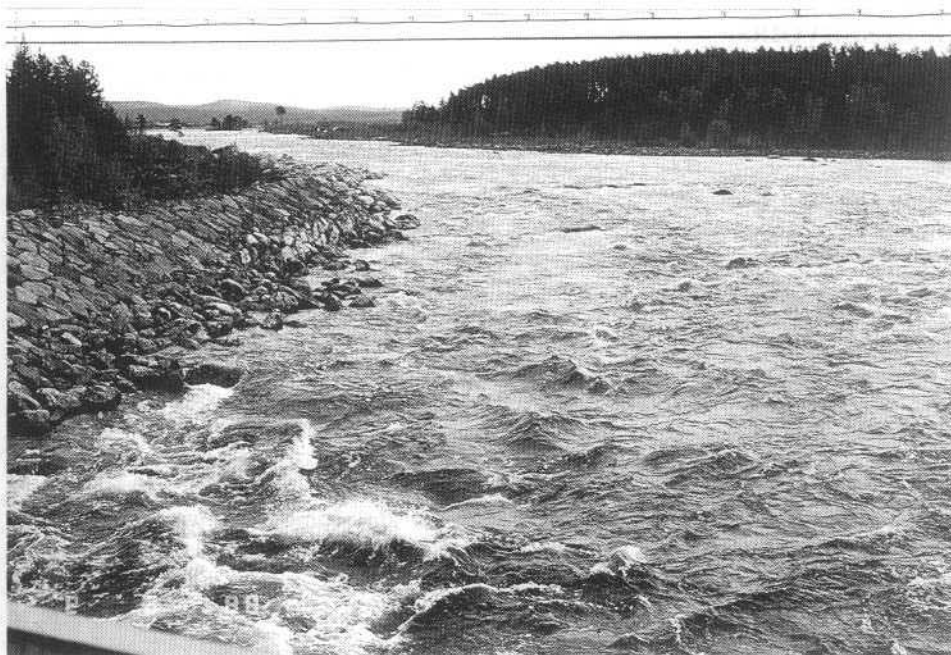
Shoreline erosion in man-made lakes may damage buildings, roads, bridges, etc. Often the indirect effects are less spectacular, but more important, as the sediment production affects water quality, bottom conditions, and biological life in the reservoir. Heavy sediment build-ups (deposits) may occur followed by lush vegetation growth thereon especially along riverbanks and on floodplains.

In some situations, shoreline erosion is considered one of the major environmentally negative impacts. Provisions to minimize this process could have economic and environmental benefits.

#### 3.1.1. Reservoir shoreline protection

Shoreline protection works are always built wherever bridges, roads, building, and other objects of considerable economic value could be damaged by erosion. At other shoreline sections, it may be necessary to protect the shore in order to reduce erosion, preserve valuable land, prevent increase of water turbidity and sediment transport, and preserve the attraction of the landscape.

Différentes méthodes de protection se présentent; elles dépendent des conditions locales et des matériaux de protection disponibles. Le but est de mettre en œuvre des moyens efficaces de maîtrise de l'érosion, qui soient aussi naturels que possible. Cependant, du fait de pénurie de pierres naturelles, la protection des rives est souvent réalisée en matériaux rocheux provenant de carrières, comportant par-



fois des matériaux filtrants en dessous. Les endroits touristiques, etc., nécessitent souvent une protection. Dans certains cas (ponts, etc.), on utilise des gabions, des systèmes brevetés de revêtements constitués de blocs, des géotextiles, ou même des traitements bitumineux (par exemple, à Taiwan).

Parfois, il s'avère approprié de couper une pente raide avant la mise en eau du barrage et de constituer une plate-forme d'érosion artificielle à proximité du niveau supérieur de retenue, si ce niveau sera fréquent dans le futur. On peut empêcher la formation de zones marécageuses et de mares d'eau stagnante au moyen de digues de protection (il y a de bons exemples de telles réalisations à Taiwan, en Suisse et en Allemagne).

Les dispositifs de protection des rives contre l'érosion comprennent des ouvrages et de la végétation suivant des combinaisons variées. Une végétation appropriée améliore la fonction de protection et contribue à donner un aspect naturel aux rives. Des études ont été faites en vue de sélectionner des espèces de plantes (par exemple, *Paspalum vaginatum*), capables de résister à des conditions défavorables (submersion pendant une partie de la saison de pousse). Plusieurs espèces de saule et d'herbe ont donné satisfaction. On a également constaté que la réussite ou

Different methods of shoreline protection are possible, depending upon local conditions and protective materials available. The intention should be to construct effective erosion controls that look as natural as possible. However, because of shortage of natural stone material, shoreline protection often consists of rocky material from quarries, sometimes with a filter material underneath. Places which

Photo 4

Erosion control measures (Sweden).  
*Protection contre l'érosion (Suède).*

are of interest for tourism, etc., often require protection. Under special circumstances (at bridges, etc.), gabion mattresses can be used or patent block revetments, geotextiles or even asphaltic treatment (e.g. in Taiwan).

Sometimes it may be suitable to cut a steep slope before the damming and form an artificial erosion platform close to the upper storage level, if this will be a frequent water stage in the future. Swampy areas and ponds of trapped stagnant water can be prevented by isolating bunds. There are good examples thereof in Taiwan, Switzerland and Germany.

The methods of bank protection involve both structural and vegetative erosion control features in various combinations. A suitable vegetation improves the protection function and contributes to the natural appearance of the shoreline. Studies have been carried out to segregate plant species (e.g. *Paspalum vaginatum*) able to survive unfavourable conditions (e.g., inundation during a part of the growth season). Several willow and grass species were rather successful. It was also discovered that the success or failure of the greenery applied on the face of a slope



l'échec de la plantation réalisée sur un versant dépendait beaucoup des mesures prises pour maîtriser l'érosion du terrain naturel ou excavé, sous l'action des vagues. S'il n'y a pas de raison majeure de construire des ouvrages anti-érosion, il est souvent préférable de laisser la nature constituer le nouveau rivage. On doit, cependant, se rappeler que la nouvelle répartition des sédiments dans la retenue peut influencer sur l'ensemble du système biologique, et beaucoup de temps peut s'écouler avant qu'un nouvel équilibre soit atteint.

La régularisation des eaux a des conséquences sur la végétation des berges à l'amont et à l'aval des barrages. Par exemple, la répartition naturelle de la végétation en zones devient limitée et la régularisation à court terme nuit à la croissance des espèces de plantes à racines profondes.

La forte interaction entre végétation et érosion fait que, lorsque la retenue atteint les niveaux où la végétation a souffert, l'érosion s'accélère. Le risque augmente avec l'amplitude et la fréquence des marnages. Parfois, il est possible de protéger la végétation, mais c'est souvent difficile.

Dans certains cas (par exemple, construction de canaux d'amenée et de fuite pour les usines hydroélectriques), un aménagement paysager est susceptible de rendre les rives plus attrayantes. Dans les zones où de grandes quantités de matériaux de fouilles, peu fertiles et contenant peu d'éléments fins, sont déposées le long des canaux, ces tas de matériaux peuvent être modelés et revêtus de végétation (arbres, herbe, etc.) après application d'un liant et d'engrais. Il importe de prendre ces dispositions en tenant compte du climat dominant, des conditions de sol et de la végétation avoisinante.

### **3.1.2. Glissements de terrain**

Sur les versants présentant déjà des glissements de terrain et sur ceux où des glissements peuvent se manifester, la stabilité doit être assurée avant la mise en eau de la retenue.

Un glissement est une masse de roche ou de terre qui s'est déplacée ou peut se déplacer vers le bas du versant au-dessus d'un sol stable sous-jacent. Ces glissements se reconnaissent généralement à la présence de monticules sur la surface du terrain, ou d'escarpements et de fissures de traction.

La submersion d'un glissement, résultant de la mise en eau d'une retenue, a plusieurs effets. Dans la plupart des cas, ces effets sont défavorables et la stabilité est réduite. Tout mouvement important survenant après le remplissage risque de provoquer des vagues, des grosses lames d'eau, des courants et une obstruction locale de la retenue.

Dans les zones où les couches d'argile, sur lesquelles un glissement s'est déjà produit, sont sèches, leur humidification risque d'entraîner une perte de résistance. L'humidification des matériaux de pied de la masse de terrain susceptible de glisser affecte aussi la résistance de frottement. L'action de l'eau diminue la masse volumique de la roche, ce qui conduit à une diminution de la résistance de frottement. Cet effet est plus ou moins important suivant que le pied du glissement est habituellement très sec ou mouillé.

is greatly dependent on the countermeasures for wave erosion control on the natural or excavated base terrain. If there are no important reasons to construct erosion control works, it is often better to allow the natural processes to form the new shoreline. It must be kept in mind, however, that sediment redistribution within the reservoir may influence the whole biological system, and it may take a very long time before a new balance is reached.

Regulation of waters has consequences for the shoreline vegetation, both upstream and downstream of dams. For example, the natural zoning of the vegetation becomes restricted and short-term regulation damages the growth of rooted plant species.

The strong interactions between the vegetation and erosional processes imply that when the water reaches levels where the vegetation is damaged, erosion accelerates. The risk increases with the amplitude and frequency of water-level fluctuations. Sometimes it is possible to protect the vegetation, but often it is difficult.

In some instances (e.g. the construction of inlet and outlet channels for hydroelectric powerplants), active landscaping may render the shores more attractive. Where large amounts of excavated material of low fertility and low content of fine soils are deposited along the channels, they could be moulded and provided with a cover of vegetation (trees, grass, etc.) after adding binding material and fertilizing. It is important to take these steps in harmony with the prevailing climate, soil conditions, and the surrounding vegetation.

### **3.1.2. Landslides**

On hillsides with already existing landslides and hillsides with sections that could develop into landslides, the stability must be ensured before filling the reservoir.

A landslide is a body of rock or soil which has moved or has the potential to move downslope over the underlying stable ground. Landslides are usually recognized by the hummocky nature of the ground surface or the presence of scarps and tension cracks.

The submergence of a landslide, due to the filling of a lake, has several effects. In most cases, these effects are unfavourable, and the stability is decreased as a result. Any subsequent major movement can lead potentially to waves, surges, currents and local damming of the reservoir.

In landslides where the clay layers on which sliding has occurred are dry, wetting may cause a loss in strength, leading to a decrease in stability. The wetting of the landslide toe materials also affects the frictional resistance in this location. The water acts to decrease the effective weight of the rock with the result that less frictional resistance is generated. This effect is greatest where the landslide toe is currently very dry and least where it is currently wet.



Photo 5

Aerial view of the Upper Cromwell Gorge (Clyde Power Project, New Zealand) showing some of the major landslides that will be affected by lake-filling. The landslides shown are : Jackson Creek (JC), Two Bridges (TB), Dunlays Orchard (DO), Flying Fox (FF), No. 5 Creek (No. 5 C), Nine Mile Creek Downstream and Upstream [NMC (ds) and NMC (us) respectively], and Cairnmuir (C). Most of the landslides are on the eastern side of the valley, which is partially a foliation dip slope. The gravel terraces (T) indicate that the slides have undergone little significant movements in the past 50 000 years.

Stabilisation works for the Jackson Creek landslide are clearly visible. They include a toe rockfill buttress (B) of some 1.2 million m<sup>3</sup>, 8.1 km of drainage drives (portal at DP), and 8.4 km of drainage drilling.

*Vue aérienne de la Gorge Supérieure Cromwell (Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande), montrant quelques-uns des principaux glissements de terrain qui seront affectés par le remplissage de la retenue. Les glissements indiqués sont : Jackson Creek (JC), Two Bridges (TB), Dunlays Orchard (DO), Flying Fox (FF), No. 5 Creek (No. 5 C), Nine Mile Creek Downstream (Aval) et Upstream (Amont) [NMC (ds) et NMC (us) respectivement], Cairnmuir (C).*

*La plupart des glissements se situent sur le côté oriental de la vallée, qui est, en partie, un versant à foliation plongeante. Les terrasses de gravier (T) indiquent que les glissements ont subi des mouvements peu importants au cours des derniers 50 000 ans.*

*Les ouvrages de stabilisation du glissement Jackson Creek sont nettement visibles. Ils comprennent : une butée de pied en enrochement (B) de 1,2 million m<sup>3</sup> environ, 8,1 km de galerie de drainage (entrée à DP) et 8,4 km de forage de drainage.*

Le remplissage du réservoir influe également sur la nappe phréatique à l'intérieur et au-dessous des glissements. Dans certains cas, la réponse de la nappe phréatique est relativement simple, et l'effet du remplissage peut être prédit et vérifié par des observations. Il y a aussi des situations où le système aquifère est plus complexe, le remplissage de la retenue entraînant de fortes augmentations des pressions d'eau sur de vastes zones. De telles situations ont été constatées dans la Gorge Cromwell, en Nouvelle-Zélande, où la stabilité de glissements existants sera affectée par la réalisation du barrage Clyde. Des mesures préventives sont actuellement mises en œuvre pour combattre les effets nuisibles de la création du réservoir (voir Gillon M. D. *et al.*).

#### A) Reconnaissances et études des glissements de terrain

Les reconnaissances et études des glissements de terrain sont une tâche difficile et un véritable défi, faisant appel à des experts appartenant à de nombreuses disciplines (géologues, géomorphologues, ingénieurs, géotechniciens, chimistes).

Ces travaux se déroulent suivant un certain nombre d'étapes, avec une recherche croissante de détails. La quantité de détails nécessaires dépend de l'activité, de la nature et du risque s'appliquant au glissement en question.

Les reconnaissances débutent par l'établissement d'une carte et la description géologique de la surface du terrain. A partir des informations recueillies, beaucoup d'éléments peuvent être obtenus sur les dimensions, la nature et l'activité du glissement. Une connaissance approfondie de la géologie et de la géomorphologie est essentielle pour la compréhension du glissement. Les informations sont obtenues, non seulement à partir du glissement en question, mais également de zones identiques situées à proximité. On utilise également des forages, des méthodes géophysiques, des mesures d'auscultation pour connaître les caractéristiques des glissements et disposer d'éléments de base pour l'étude de tous travaux de protection. Des carottes sont extraites des forages afin d'avoir des renseignements sur les matériaux constituant la masse susceptible de glisser, en particulier sur l'emplacement des zones de faible qualité où le glissement peut survenir, avec indication de la profondeur jusqu'au rocher. Partout où existent des matériaux de faible qualité (argile, phyllites, mica, etc.), les caractéristiques de la surface de glissement seront soigneusement décrites et des échantillons seront prélevés pour des essais en laboratoire. Ces derniers sont parfois très sophistiqués, en particulier si des résistances au cisaillement résiduelles sont nécessaires dans le cas de glissements historiques. Des forages et des piézomètres donneront également des informations capitales sur la nappe phréatique à l'intérieur du glissement.

Les renseignements fournis par les forages sont parfois complétés en utilisant des procédés d'investigation géophysiques : méthodes sismiques ou mesures de résistivités électriques. Ces procédés sont très utiles pour détecter la présence d'une nappe phréatique ou déterminer la profondeur du glissement, dans la mesure où existent des anomalies significatives de vitesse ou de conductivité.

Le contrôle des déplacements de la masse de terrain instable est une partie importante des reconnaissances. L'activité du glissement est tout d'abord estimée à

The rising reservoir also affects the groundwater systems within and beneath landslides. In some situations, the response of the groundwater system is relatively simple, and the effect of reservoir filling is predictable and can be confirmed by monitoring. There are also situations where the groundwater systems are more complex, and lake filling could be the cause of considerable increases in water pressure over large areas. Examples of this situation have been encountered in the Cromwell Gorge in New Zealand, where the stability of existing landslides will be affected by the Clyde Dam project. Preventive remedial measures are now being constructed to offset the adverse effects of reservoir formation (see Gillon M. D. *et al.*).

#### A) *Investigating landslides*

Investigating large landslides is a challenging and difficult task, involving a wide range of disciplines (geologists, geomorphologists, engineers, geotechnicians and chemists).

Investigation usually proceeds through a number of stages with increasing detail being sought. The amount of detail required depends on the activity and nature and hazard of the particular landslide.

Investigation starts with the mapping and description of the surface geology. Much can be inferred from this information about the size, nature, and activity of the landslide. A thorough appreciation of the geology and geomorphology is essential to an understanding of the landslide. Information is obtained, not just from the landslide in question, but also from similar areas nearby. Borehole investigations, geophysical surveys and monitoring are also utilised to provide an understanding of the characteristics of landslides and a basis for the design of any necessary remedial works. Boreholes are cored to provide information on the materials in the landslide, in particular the location of zones of weak material where sliding can occur and the depth to in situ rock. Wherever weak (clay, phyllites, mica, etc.) materials are located, the nature of the sliding surface is carefully described, and samples are taken for laboratory testing. The laboratory testing required may be quite sophisticated, particularly if residual shear strengths are needed in the case of historic slips. Boreholes and piezometers are also the main source of absolutely vital information about groundwater within the landslide.

Borehole information is sometimes supplemented by using geophysical exploration methods. This involves the use of either seismic surveys or measurements of electrical resistance. These methods are most useful in detecting the presence of groundwater or in determining the depth of the landslide, so long as significant velocity or conductivity anomalies exist.

Monitoring of landslide movements is an important part of the investigation. Initially the activity is judged from the appearance of scarps and cracks. The next

partir de l'aspect des escarpements et des fissures. L'étape suivante consiste à installer des points de mesure des mouvements réels. Ces points peuvent être des repères topographiques, situés sur le glissement ou de part et d'autre de fissures et escarpements. Des points de mesure sont également installés dans des galeries de reconnaissance et de drainage, lorsque c'est possible. Si la vitesse de glissement est très faible, plusieurs mois sont souvent nécessaires pour déterminer si un mouvement se produit.

Du fait des erreurs inhérentes aux mesures topographiques, un mouvement ne sera mis en évidence que lorsqu'il dépassera nettement l'erreur de mesure. Pour les mouvements très lents, cela peut prendre quelques années.

En plus des mesures topographiques effectuées en surface ou en galeries, on peut également mesurer les mouvements à l'intérieur de forages. De tels forages sont équipés d'un tube scellé au ciment, comportant des rainures. Un appareil, appelé inclinomètre, est descendu dans le trou et mesure le profil du forage avec beaucoup de précision. En comparant des mesures successives et l'amplitude du mouvement, on déterminera son emplacement et sa direction approximative. Les renseignements tirés des inclinomètres sont particulièrement précieux du fait que les glissements présentent souvent plusieurs surfaces sur lesquelles les déplacements peuvent se produire. De telles mesures ont un avantage considérable sur celles exécutées en surface qui indiquent seulement si un mouvement se manifeste en un point de la surface. L'exécution de forages jusqu'à 200 m de profondeur dans des matériaux fracturés est un travail difficile, spécialement en hiver. Une telle exécution demandera parfois 2 à 3 mois.

## B) *Stabilisation des glissements*

Les reconnaissances et étude de chaque glissement ou zone de glissement possible déterminent si des travaux de stabilisation sont nécessaires. Il y a un nombre limité de solutions pour contrecarrer, le cas échéant, l'effet du remplissage d'une retenue. Les dimensions des glissements écartent, en général, des mesures telles que murs de soutènement et stabilisation du sol au moyen de tirants. Les mesures les plus efficaces sont : le drainage par gravité et la butée de pied. Le drainage d'un glissement supprime les forces élevées de déstabilisation. Ce procédé ne s'applique efficacement qu'aux glissements possibles dans lesquels ou sous lesquels de grandes quantités d'eau sont susceptibles d'être piégées, maintenant ou dans le futur.

Le drainage a été mis en œuvre avec succès pour stabiliser de grands glissements en bordure de réservoirs hydroélectriques, en Colombie Britannique et Nouvelle-Zélande. Dans certains cas, des galeries de drainage présentent un grand intérêt.

La butée de pied consiste à mettre en place un massif de remblai au pied d'un glissement pour augmenter la résistance de frottement. Cette mesure vise à compenser la diminution de résistance résultant de la submersion de la zone de pied.

stage is the installation of monitoring points where actual movement measurements can be made. These points may be survey markers, either on the landslide or across cracks and scarps. Measurement points are also established in investigation and drainage tunnels, where possible. Where landslide movement rates are very small, it takes many months to establish whether movement is occurring.

Because of the errors in the survey measurements, movement cannot be demonstrated until it considerably exceeds the survey error. In the slower moving landslides, this may even take a few years.

In addition to survey measurements on the surface or in tunnels, it is also possible to measure movements down boreholes. Boreholes which are used to measure movements have a slotted pipe cemented into the hole. An instrument called an inclinometer is lowered down the hole, which measures the profile of the borehole very accurately. By comparing successive measurements and the amount of movement, its location and approximate direction can be determined. Information from inclinometers is particularly valuable because landslides often have several surfaces on which sliding can occur. This is a considerable advantage over surface measurements which can only determine whether movement is occurring at a point on the landslide surface. Drilling boreholes up to 200 m deep in broken landslide materials is a difficult task particularly in winter. These drillholes may take 2-3 months to complete.

#### B) *Stabilizing landslides*

The need for stabilization is determined following the investigation of each landslide or possible landslide area. There are a limited number of options to counteract the effect of lake filling where this is found to be necessary. The size of the landslides generally precludes such measures as retaining walls and large ground anchors. The most effective measures are gravity drainage and toe buttressing. Drainage of water from a landslide removes large destabilizing forces. This measure can only be effective where a potential landslide is predicted to have, now or in the future, large amounts of water trapped within or under it.

Drainage measures have been successfully used to stabilize large landslides bordering hydro reservoirs in British Columbia and New Zealand. On occasion drainage tunnels or adits are of considerable value.

Toe buttressing is the placing of fill material at the toe of a landslide to increase the frictional resistance. This is used to help offset the decrease in resistance caused by inundation of the toe area.







Fig. 1

Stabilisation works for Jackson Creek Landslide. Clyde Power Project, New Zealand.  
(Stabilisation works include drainage and buttressing works.)

*Ouvrages de stabilisation du glissement de terrain Jackson Creek. Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande.*  
(Ces ouvrages comprennent des dispositifs de drainage et de butée.)

- (1) Lobe 1.
- (2) Upper slide.
- (3) Tension crack.
- (4) Slide debris.
- (5) Buttress.
- (6) Temporary buttress (during construction).
- (7) Drillholes.
- (8) Drainage works.
- (9) Sub-basal schist.
- — — Preferred model failure surface.
- · — · — Alternative model failure surface.
-  Alluvium.
- DL 315 Drainhole 315.
- M Movement.
- CZ 2 Crush zone 2.
- Piezometric surfaces (original, pre-lake, pre-drainage) :  
— x — x — Perched.  
..... Sub-Basal.

- (1) Lobe 1.
- (2) Glissement supérieur.
- (3) Fissure de traction.
- (4) Débris de glissement.
- (5) Butée.
- (6) Butée provisoire (pendant la construction).
- (7) Forages.
- (8) Dispositifs de drainage.
- (9) Substratum de schiste.
- — — Surface de rupture dans le modèle choisi.
- · — · — Surface de rupture dans un autre modèle.
-  Alluvions.
- DL 315 Forage de drainage 315.
- M Mouvement.
- CZ 2 Zone broyée 2.
- Surfaces piézométriques (à l'origine, avant retenue, avant drainage) :  
— x — x — Perchée.  
..... Sous-jacente.

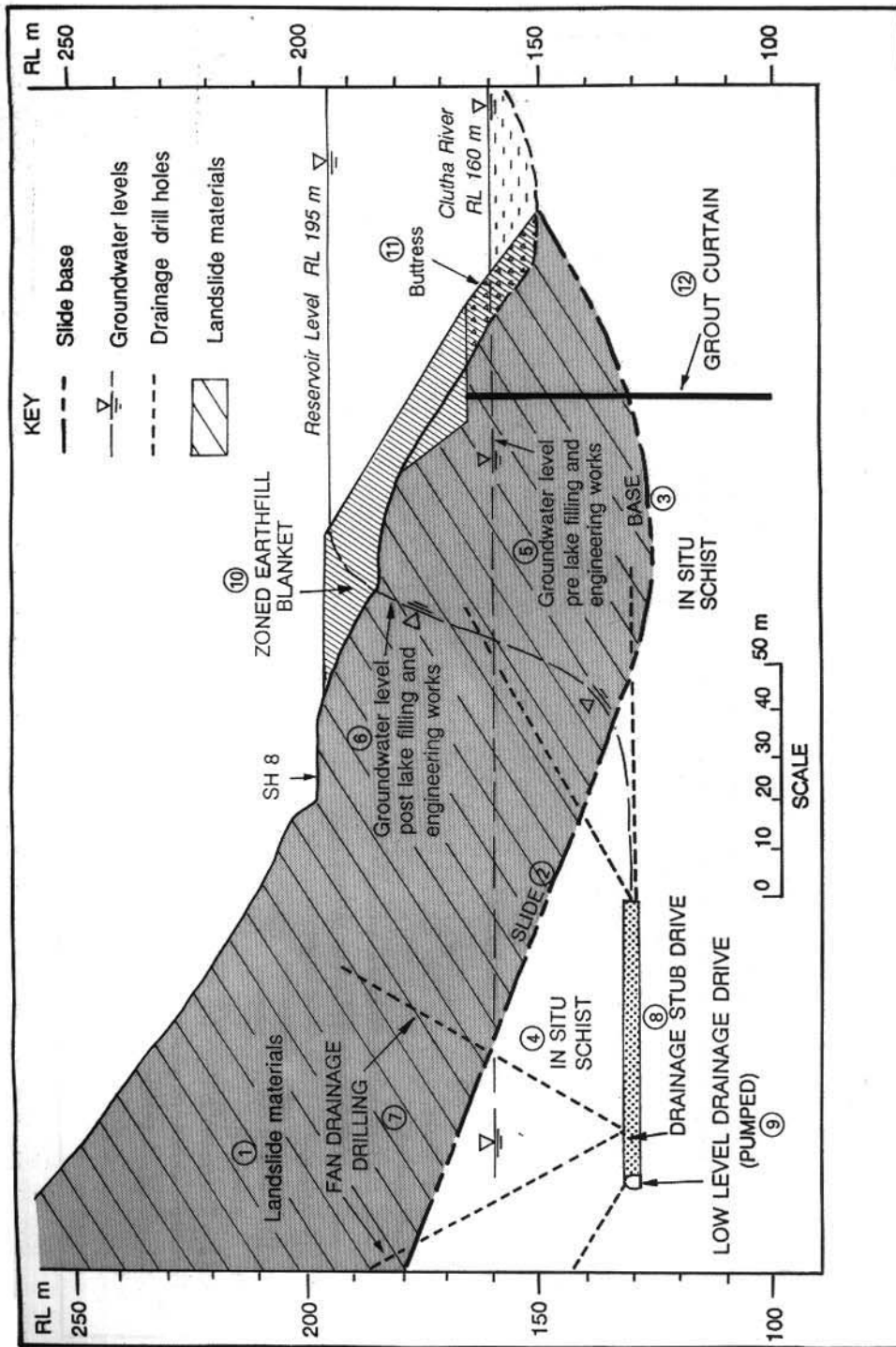



Fig. 2

Stabilisation works for Brewery Creek Landslide, Clyde Power Project, New Zealand.  
 (Stabilisation works include low level pumped drainage, grouting and blanketing works.)  
*Ouvrages de stabilisation du glissement de terrain Brewery Creek. Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande.*  
 (Ces ouvrages comprennent : drainage à niveau bas avec pompage, injections, mise en place d'un tapis en terre).

- |  |  |
|--|--|
| (1) Landslide materials.                                       | (1) Matériaux du glissement.   |
| (2) Slide.   | (2) Glissement.  |
| (3) Base.  | (3) Base du glissement.  |
| (4) In situ schist.  | (4) Schiste in situ.   |
| (5) Groundwater level pre lake filling and engineering works.  | (5) Niveau de la nappe phréatique avant remplissage de la retenue et travaux de stabilisation. |
| (6) Groundwater level post lake filling and engineering works. | (6) Niveau de la nappe phréatique après remplissage de la retenue et travaux de stabilisation. |
| (7) Fan drainage drilling.                                     | (7) Forages de drainage en éventail.   |
| (8) Drainage stub drive.                                       | (8) Galerie de drainage.   |
| (9) Low level drainage drive (pumped).                         | (9) Galerie de drainage à niveau bas (pompage).  |
| (10) Zoned earthfill blanket.                                  | (10) Tapis en terre zonée.   |
| (11) Buttress.   | (11) Butée.  |
| (12) Grout curtain.  | (12) Rideau d'injection.   |
- 
- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| — — — —   | Base du glissement.             |
| — — — —   | Niveaux de la nappe phréatique. |
| — — — —   | Forages de drainage.            |
|  | Matériaux du glissement.        |



### **3.2. PROTECTION DES RIVES DANS LES ESTUAIRES AVEC FERMETURE TOTALE OU PARTIELLE**

La partie sud-ouest des Pays-Bas comprenait, à l'origine, un certain nombre d'estuaires. En raison de la réalisation de divers ouvrages d'art, spécialement dans le cadre du Plan Delta, la plupart de ces estuaires sont actuellement totalement ou partiellement fermés pour protéger les basses terres et les cités contre les houles de tempête. Dans les lacs nouvellement créés et dans les bassins où les marées sont réduites derrière les barrages de fermeture, la situation de la zone de transition entre terre et eau, du rivage et de la zone intertidale diffère de celle qui existait précédemment avec marée libre. Le changement de conditions a entraîné d'autres processus morphologiques dominés par l'action des vagues, provoquant souvent une érosion.

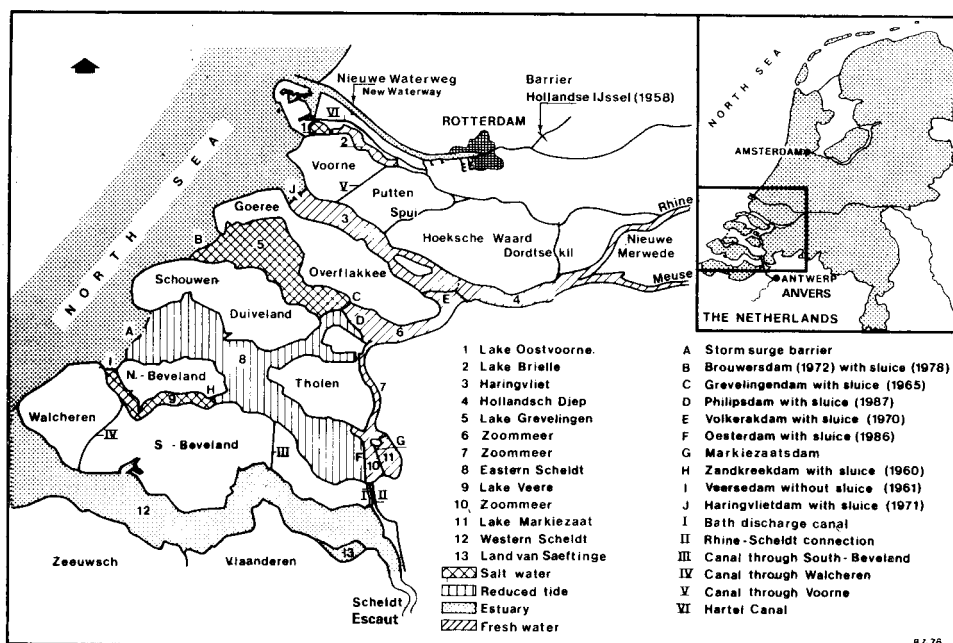
Photo 6

Construction of low permeability blanket adjacent to the toe of the Brewery Creek Landslide,  
Clyde Power Project, New Zealand.

*Construction d'un tapis de faible perméabilité au pied du glissement de terrain Brewery Creek,  
Aménagement hydroélectrique Clyde, Nouvelle-Zélande.*

### **3.2. SHORELINE PROTECTION IN DAMMED-UP AND PARTIALLY DAMMED-UP ESTUARIES**

The southwestern part of the Netherlands originally consisted of a number of estuaries. Due to various engineering works, especially within the scope of the so-called Delta Project, most of these estuaries are now dammed or partially dammed to protect lowlands and cities against surge floods. In the newly formed lakes and the reduced tidal basin behind the storm surge barrier, the situation of the transition zone between land and water, the shore and the intertidal zone, differs from the former (full) tidal circumstances. The changes of the boundary conditions resulted in other morphological processes dominated by wave action, in many cases causing erosion.



### 3.2.1. Estuaires avec fermeture totale

Le rivage et la zone intertidale résultent d'un processus dynamique comportant plusieurs facteurs généraux et locaux : d'une part, les forces dues aux courants, vagues, mouvements de l'eau provoqués par la navigation et variations du plan d'eau (amplitude des marées), et, d'autre part, des facteurs tels que : emplacement, exposition, composition des sédiments, végétation et activités humaines.

Dans les nouveaux lacs, la fermeture des bras de mer réduit nettement l'amplitude des marées de plusieurs mètres à pratiquement zéro. Une parfaite compréhension des processus morphologiques est essentielle pour décider quelles mesures sont souhaitables et à quel moment.

Du fait que des techniques de prévision et des critères de projet appropriés n'étaient pas disponibles, à l'époque, les mesures destinées à protéger les hauts-fonds et les zones soumises aux marées étaient le plus souvent prises lorsqu'une menace, observée visuellement, devenait sérieuse. Cependant, en raison de l'augmentation progressive des connaissances sur les ouvrages adoptés et sur les conséquences morphologiques et écologiques associées, les prévisions et le choix de mesures adéquates s'améliorèrent aussi progressivement.

Au cours des vingt dernières années, les méthodes d'étude des rivages et de leur érosion ont beaucoup évolué. Auparavant, on se concentrait sur des solutions

Fig. 3

The Delta Project in the southwestern part of the Netherlands.

*Le Plan Delta dans le sud-ouest des Pays-Bas.*



### 3.2.1. Dammed-up estuaries

The shore and the intertidal zone are the dynamic result of many general and local factors. These are, on the one hand, the forces due to currents, waves, ship-induced water motion and water-level fluctuations (tidal range), and on the other hand, factors like location, exposure, sediment composition, vegetation, and human activities.

In the newly formed lakes, due to the closure of the sea arms, the tidal range changed drastically from a few meters to practically zero. To predict which measures are desirable and when, a proper understanding of the morphological processes is essential.

Because the proper prognosis techniques and design criteria, at the time discussed, were not available, the measures to protect the former shoals and tidal flats were mostly taken when a threat, visually observed, became acute. However, due to the gradually increasing knowledge of the structures used and the morphological and ecological response to them, the possibilities of better prognosis and choice of proper measures were also increasing.

During the last 20 years, there has been significant development in the approach to shore processes and in dealing with shore erosion. Former thinking



rigides, tandis que maintenant on adopte une approche plus différenciée et plus souple. La méthode rigide signifie que l'érosion est stoppée au moyen de procédés techniques nécessitant des travaux d'entretien aussi faibles que possible, tandis que l'approche différenciée se caractérise par la recherche de solutions tenant compte des aspects écologiques et fonctionnels et du temps nécessaire aux évolutions naturelles.

#### A) *Stratégie générale*

La méthode différenciée conduit à une stratégie générale basée sur les points suivants :

- inventaire et rapports sur les états actuel et futur des zones concernées; cela comprend, entre autres, une connaissance de la politique et de la conception physique s'appliquant à la zone ou au bassin dont le rivage fait partie;
- étude des processus hydrauliques, morphologiques et écologiques;
- prévision des changements futurs;
- évaluation sociale des changements, conduisant, le cas échéant, à l'adoption de mesures;
- choix et mise en œuvre des mesures;
- observations des changements et adaptation des mesures.

En ce qui concerne les aspects naturels, il est utile de distinguer les caractéristiques suivantes :

- a) Des eaux peu profondes sont très appréciées :
  - du fait de la richesse en flore et faune du fond;
  - comme zone fournissant de la nourriture aux oiseaux, en particulier aux échassiers;
  - comme zone de végétation aquatique servant de frayères, principalement dans les eaux douces.
- b) Des rivages présentant les caractères suivants sont très appréciés :
  - passage progressif de l'habitat aquatique à l'habitat terrestre;
  - zone fournissant de la nourriture et lieu de nidification pour les oiseaux;
  - formes toujours changeantes des rives;
  - rivages semblant (et étant) très naturels dans le paysage.

Dès le début de l'étude des aménagements techniques côtiers, le principal point de vue formulé était que des mesures techniques de protection des rives n'étaient pas toujours nécessaires. En tenant compte des processus naturels et des matériaux naturels, associés éventuellement à des matériaux artificiels, il est possible de réaliser une protection de rives, adéquate et écologique, en vue de

concentrated on rigid solutions, while today a more differentiated and flexible approach is coming into the picture. The rigid approach means stopping erosion with technical methods with as little maintenance effort as possible, while the differentiated approach is characterized by finding solutions, taking account of environmental and functional aspects and time necessary for natural developments.

#### A) *General management strategy*

The differentiated approach led to a general management strategy based on the following lines :

- inventory and documentation of the actual and future state of areas concerned; this contains, among other things, knowledge of the policy and physical planning for the area or water basin of which the shore zone is a part;
- study of hydraulic, morphological, and ecological processes;
- prediction of the future changes;
- social evaluation of the changes resulting in the eventual need for measures;
  
- choice of measures and implementation;
- monitoring of changes and adaptation of measures.

Regarding the natural aspects, the following desirable characteristics are distinguished in the approach :

a) Shallow water is highly appreciated :

- because of the rich bottom flora and fauna;
- as feeding area for birds, with special reference to waders;
  
- as a habitat for water vegetation that functions as a spawning area for fish, especially in fresh water.

b) Flexible shorelines are highly appreciated :

- because of the gradual transition from aquatic to terrestrial living communities;
- as feeding and nesting area for birds;
- because of the dynamic aspects and the ever-changing shapes of the shoreline;
- because they look (and are) the most natural in the landscape.

Already at an early stage of the implementation of discussed coastal engineering schemes, the principal view point was formulated that purely technical shore protection measures are not always necessary. Taking into consideration the knowledge of natural processes and natural materials, eventually in combination with some artificial materials, it is possible to build appropriate ecological shore

maîtriser les phénomènes d'érosion. En introduisant des éléments biologiques dans les solutions, on peut également réduire les coûts. Au lieu de lutter contre la nature, on utilisera les principes de la dynamique des rives.

Cette méthode se reflète à la fois dans le choix des matériaux (par exemple, sable pour le remplissage de zones sableuses) et dans la conception du projet qui doit s'adapter parfaitement aux forces dynamiques.

Le choix des mesures de protection dépend aussi, aujourd'hui, des valeurs attribuées aux utilisations de l'eau dans la zone considérée : loisirs, pêche, nature, navigation. Avant d'adopter une mesure, les aspects suivants doivent donc être analysés :

- quelle utilisation de cette zone souhaite la société?
- quels sont le type et l'importance probables de l'érosion en l'absence de mesures de protection?
- peut-on prendre la responsabilité ou est-il opportun de ne rien faire?
- si des mesures sont nécessaires, quels sont les moyens à mettre en œuvre pour combattre ou contrôler l'érosion, tout en préservant le plus de fonctions possibles (par exemple, paysage, écologie) dans la zone des rives?

Pour aboutir à un choix, il est nécessaire de procéder méthodiquement. Une analyse prudente est recommandée à cet effet. Le principe de cette méthode consiste à ne prendre aucune décision au cours de l'étude. Seuls les arguments pour et contre applicables aux diverses solutions sont recueillis et leurs valeurs respectives correctement comparées. Le choix final suit une telle étude comparative.

## B) Mesures appliquées pour la protection des rives

Les mesures appliquées pour la protection des rives sont les suivantes :

- Ouvrages de protection au large des rives sous forme de barrages en graviers ou moellons bruts (parfois submergés). Ils sont principalement adoptés pour des profondeurs d'eau inférieures ou égales à 1 m, lorsqu'une zone de faible pente existe, créant un bassin peu profond et calme (d'environ 30-100 m de largeur), de valeur écologique élevée (végétation riveraine, oiseaux aquatiques, frayères), ou propice aux activités de loisirs. Pour assurer l'accessibilité et la qualité de l'eau à l'arrière des barrages, ceux-ci devront être équipés de pertuis (d'environ 20 m de largeur), régulièrement espacés.

- Mesures de protection au large associées à des apports de sable. Lorsqu'une grande étendue de hauts-fonds existe, un remblai de sable, au large, comportant une protection en gravier côté lac, peut être mis en place. On obtient ainsi une île dans une eau calme, peu profonde, de grande valeur écologique (végétation, poissons, oiseaux), pouvant être utilisée comme lieu de loisirs.

protection to control the erosion processes. By involving biological elements in the solutions, reduction in costs may also be achieved. Principles of shore dynamics should be used instead of fighting against nature.

This approach is reflected in both the choice of material (e.g., sand for sand replenishment) and the form of design most adapted to dynamic forces.

The choice of protective measures today also depends on a weighing value of functions within the area considered. Such functions are recreation, fishery, nature, and shipping. Thus, before choosing a measure, the following aspects have to be analyzed :

- what does society want to do with this area?
- what kind and what amount of erosion is likely to happen without taking measures?
- is doing nothing responsible/desirable?
- if not, how can erosion be fought or controlled with preservation of as many functions of the shore zone as possible (e.g., landscape, ecology)?

To arrive at a choice, it is necessary to proceed systematically. A so-called policy analysis is recommended for this purpose. The principle of this method is that no decision is taken during analysis. Only the pro and contra arguments for different solutions are collected and properly weighed against each other. The final choice follows a balanced assessment.

#### *B) Applied shore protection measures*

The shore protection measures applied are :

- Offshore protection structures in the form of gravel or rubble dams (sometimes submerged). These are mostly applied at a water depth equal or less than 1 m when a gentle sloped zone is present, creating a calm, shallow water area (about 30-100 m width) with high ecological values (riparian vegetation, waterfowl, spawning fish) or suitable for recreational activities. To guarantee the accessibility and the water quality behind the dams, these should have regularly spaced openings (about 20 m width).

- Offshore protection measures combined with sand supplementation. When a very large shallow area is present, an offshore sand supply source with a protection of gravel at the lake side can be applied. This secures an island with a calm, shallow water area of great ecological value (vegetation, fish, birds) which may be used and furnished for recreational activities.



Photo 7

Offshore protection structure in the form of rubble dams in the Haringvliet (Netherlands)  
creating calm shallow water areas with high ecological values  
(riparian vegetation, spawning grounds for fish, waterfowl).

*Ouvrage de protection au large constitué de digues en moellons bruts, dans le Haringvliet (Pays-Bas),  
créant des zones d'eau calme, peu profonde, de grande valeur écologique  
(végétation riveraine, frayères, oiseaux aquatiques).*

Photo 8

Offshore protection structure in Lake Grevelingen (Netherlands) in function during storm conditions.  
*Ouvrage de protection au large, dans le lac Grevelingen (Pays-Bas), au cours d'une tempête.*



– Mesures de protection appliquées aux rives elles-mêmes. L'inconvénient de telles mesures est qu'elles transforment le rivage en une zone de transition abrupte (rocailleuse) entre l'eau et la terre, éliminant ainsi souvent la végétation et les zones d'eau peu profondes complètement. Aussi, des revêtements souples sont-ils maintenant préférés : tapis souple, géotextile ou couverture végétale sur roche, maçonnerie ou béton.

### 3.2.2. Estuaire avec fermeture partielle

Dans l'estuaire à marée de l'Escaut Oriental (Eastern Scheldt), un barrage de protection contre les houles de tempête à l'entrée du bassin à marée, ainsi que deux barrages (Philipsdam et Oesterdam) séparant l'Escaut Oriental, soumis à des marées (réduites), d'un nouveau lac d'eau douce (Volkerak et Zoommeer), furent achevés en 1987 dans le cadre du Plan Delta. L'amplitude moyenne des marées dans l'Escaut Oriental diminua de 15 % environ et le volume de marée de 20 à 30 %. La vitesse maximale du courant passa de 1 m/s à 0,70 m/s environ. Si, pendant les fortes tempêtes, les vannes du barrage anti-houle sont fermées, l'eau à l'intérieur du bassin est à un niveau plus statique et provoque une érosion assez sévère sur une courte période.

Si l'évolution de l'érosion et de la sédimentation n'est pas conforme aux exigences, des mesures de maîtrise de l'érosion seront étudiées. Les études seront entreprises en avance.

Photo 9

Aerial photograph of offshore protection structures in the Haringvliet (Netherlands) during winter. In front of sand supplementation behind the rubble dam creating an island valuable for waterfowl.

*Photo aérienne des ouvrages de protection au large, dans le Haringvliet (Pays-Bas), en hiver. Apport de sable derrière la digue en moellons bruts, créant une île appréciée des oiseaux aquatiques.*

– Shore protection measures applied on the shoreline itself. A disadvantage of these protection measures on the shoreline is that such measures reduce the shore to an abrupt (stony) transition from water to land and so often eliminate vegetation and shallow water zones completely. Hence flexible revetment techniques are preferred, i.e. a yielding mattress, geofabric or vegetal cover over rock, masonry or concrete.

### **3.2.2. A partially dammed-up estuary**

In the tidal estuary of the Eastern Scheldt, a storm-surge barrier at the entrance of the tidal basin together with two partitioning dams (Philipsdam and Oesterdam) separating the (reduced) tidal Eastern Scheldt from a new freshwater lake (Volkerak and Zoommeer) were completed within the scope of the Delta Plan in 1987. The mean tidal range in the Eastern Scheldt decreased by around 15 percent and the tidal volume by 20 to 30 percent. The maximum current velocity changed from about 1 m/s to 0.7 m/s. If, during severe storms, the gates of the storm-surge barrier are closed, the water inside the basin will be at a more static level and cause a fairly severe erosion in a short period of time.

If potential development of erosion and sedimentation conflicts with policy requirements, erosion control measures should be considered. Research is carried out in advance on possible measures which can be used, if necessary.



Les études morphologiques sur les changements susceptibles d'affecter, dans le futur, la zone de l'Escaut Oriental indiquent que des mesures peuvent être nécessaires pour lutter contre l'érosion et la sédimentation.

D'autre part, on a exigé que cette zone conserve son caractère naturel. Cela détermine les prescriptions de projet relatives aux mesures de protection possibles (futurs), qui devront donc s'intégrer parfaitement dans l'environnement. Les conséquences sur les organismes vivants devront être réduites et les ouvrages devront être en harmonie avec le paysage existant. On devra également prendre en compte les aspects économiques.

### *Méthode d'analyse*

Une liste d'environ 150 méthodes différentes de protection contre l'érosion, existantes et de conception récente, fut établie pour les différents types d'érosion (phase 1). La technique du choix était basée sur le procédé d'analyse méthodique. Une série d'exigences était formulée pour chacune des cinq fonctions : nature, paysage, pêche, loisirs et navigation. Chaque projet était jugé suivant ces exigences (phase 2). Pour chacune des cinq fonctions, on précisait un certain nombre de propriétés souhaitables, en incluant des critères de jugement. Tous les projets ayant franchi la phase 2 étaient vérifiés vis-à-vis de ces propriétés souhaitables (phase 3). On attribuait aux fonctions un ordre de classement  $a$  (1 à 6, le chiffre le plus bas correspondant à la plus grande priorité), aux propriétés souhaitables un poids  $w$  (1 à 5), les deux classements traduisant leur importance relative d'après le jugement professionnel d'un groupe mixte d'experts appartenant aux diverses disciplines concernées. Le facteur de jugement  $j$  pour chaque propriété souhaitable dans chaque fonction se classait de 0 à 3.

Le score total  $A$  est la somme des  $(w \times j / a)$  correspondant à chaque fonction. Ce score peut aussi s'exprimer sous la forme d'un pourcentage du score maximal possible.

La liste de l'ensemble des 61 projets présentant un score supérieur à 60 % fut établie suivant l'ordre de leur score. Pour ces projets, le coût par mètre de longueur de rive était estimé, en tenant compte des travaux d'entretien futurs. Cela conduisait à un nouveau tableau de classement. Le budget pour l'étude de la protection de rives étant limité, un choix basé sur le meilleur jugement professionnel était effectué. Cela conduisit à huit projets considérés comme les plus valables et méritant une poursuite des études :

- parcs à moules sur le rivage;
- apport de gravier sur le rivage;
- apport de sable (diverses possibilités);
- brise-lames en pierres, près du rivage;
- parcs à moules près du rivage (protection indirecte);
- ouvrages provoquant des courants efficaces;
- ouvrages flottants (diverses possibilités);
- apport d'argile (en face des marais salants).

Morphological studies on future changes in the Eastern Scheldt area indicate that some measures might be necessary to control erosion and sedimentation.

On the other hand, the requirement has been formulated that this area has to keep its natural character. This defines the design requirements for the possible (future) protective measures, i.e., they have to be environment friendly. The consequences regarding living organisms have to be minimized, and the structures have to be in harmony with the existing landscape. Also, economic considerations should be taken into account.

#### *Policy analysis method*

About 150 different newly designed and existing erosion-protection methods were listed, with various types of erosion controlling effect (phase 1). The technique for making a choice was the policy analysis method. A series of requirements was formulated for each of five functions : nature, landscape, fisheries, recreation, and shipping. Each design was judged according to these requirements (phase 2). For each of the five functions, a number of desirable properties, in relation to the five functions, was formulated, including criteria for judgement. All designs that passed the phase 2 requirements-test were checked against these desirabilities (phase 3). Functions were attributed a ranking-order  $a$  (range : 1-6, highest priority : lowest number), desirabilities a weight  $w$  (range : 1-5), both indicating their relative importance according to the best professional judgement of a mixed group of experts from all relevant disciplines. The judgment-factor  $j$  for each desirability for each function ranged between 0 and 3.

Total score  $A$  is the sum of  $(w \times j / a)$  for each function. This score can also be rated as a percentage of the maximum possible score of each shore protection design.

All 61 designs with a total score of more than 60 percent were listed in the order of their score. For these designs the cost per meter of shore was estimated, taking into account the future maintenance. This again produced a score table. As the budget for research on shore protection was limited, an extra choice, based on best professional judgment was made. This resulted in eight designs judged as the most promising and worth further research. They were :

- mussel fields on the shore;
- gravel supplementation on the shore;
- sand nourishment (various possibilities);
- stone breakwater near the shore;
- mussel fields near the shore (indirect protection);
- structures inducing effective currents;
- floating constructions (various possibilities);
- clay supplementation (in front of salt marshes).

### 3.2.3. Conclusions et évaluation

Les travaux de protection des rives dans la région du Plan Delta, aux Pays-Bas, laissent apparaître les principales tendances suivantes :

1. Les ouvrages rigides (béton bitumeux) sont remplacés par des projets de caractère moins rigide (apport de sable).
2. La préservation des zones de hauts-fonds présentant une grande valeur écologique (végétation riveraine, oiseaux, poissons) devient un facteur déterminant.
3. Des éléments biologiques (plantes et coquillages, roseaux, moules) font partie des nouvelles techniques de protection des rives.
4. Les projets qui enrayent les conséquences de l'attaque des rives par les vagues ou les courants (protection sur le rivage lui-même) sont remplacés par des projets qui font obstacle aux vagues et aux courants au moyen de barrages en gravier ou d'ouvrages flottants, parallèles au rivage et situés dans les zones de hauts-fonds.

Les coûts de projets d'aspect plus conforme à la nature ou s'intégrant mieux dans la nature empêchent parfois d'autres développements. Mais souvent il est possible d'adopter une approche étape par étape pouvant rendre ce type de protection moins cher qu'un projet purement technique si les coûts des étapes différées sont décomptés. Le barrage en gravier situé au large du rivage, s'il est bien conçu, constitue une mesure efficace et peu coûteuse pour résoudre des problèmes d'érosion dans les estuaires. Les ouvrages flottants sont généralement coûteux et des critères adéquats de projet font encore défaut.

Les apports de sable semblent être une méthode très séduisante pour la maîtrise de l'érosion dans les estuaires, en particulier dans les cas où il est difficile de prédire la réponse du rivage aux ouvrages implantés. En utilisant des matériaux fins ou grossiers, dépendant des critères de projet, il est possible d'établir des projets basés sur le concept de stabilité dynamique et se conformant ainsi plus étroitement à la nature; ces projets sont également, le plus souvent, moins chers que ceux basés sur le concept de stabilité statique.

L'expérience des Pays-Bas dans le domaine des protections de rivage, naturelles ou semi-naturelles, indique qu'il est presque toujours possible d'aboutir à un ouvrage de protection satisfaisant aux diverses exigences (maîtrise de l'érosion, environnement et fonctions).

Des recherches sont encore nécessaires pour définir des critères d'efficacité et de stabilité relatifs aux éléments naturels (moules, etc.) associés ou non à des éléments artificiels.

La méthode d'étude décrite dans ce chapitre est d'une grande aide pour un choix correct de projet dans les cas où diverses exigences (souvent contradictoires) doivent être satisfaites.

En raison de la diversité des projets possibles et des critères de projet, il semble utile de coordonner les recherches sur la question de maîtrise de l'érosion. Une coopération internationale plus étroite dans ce domaine est nécessaire.

### 3.2.3. Conclusions and evaluation

The development of shore protection in the Dutch Delta Area, shows a few main trends :

1. The rigid constructions (i.e., an asphalt-concrete mixture) give way to designs with a less rigid character (i.e., sand supplementation).
2. The preservation of ecologically important shallow areas (with its riparian vegetation, birds and fish) becomes a determining factor.
3. Biologic elements (i.e., plants and shells, reed, mussels) are part of the new shore protection techniques.
4. Designs that check the consequences of wave or current attack on the shore (protection on the shore itself) are replaced by designs that check the attack of waves and currents by gravel dams or floating structures parallel to the shore in the shallow water area.

The costs of more natural or « nature-friendly » designs sometimes prevent further development. But often there are possibilities for a step-by-step approach, which can make this kind of protection even cheaper than a purely technical design, if the costs of delayed steps are discounted. The offshore gravel dam, if properly designed, is a cheap and effective measure for tackling erosion problems in estuaries. Floating constructions are mostly expensive, and there is still a lack of proper design criteria.

Sand replenishment seems to be a very attractive method for erosion control in estuaries, especially in cases where the shore response to fixed constructions is difficult to predict. By using fine or coarse materials, depending on the design criteria, it is possible to prepare designs based on the concept of dynamic stability and thus conforming more closely to nature; these designs are in most cases also cheaper than those based on the concept of static stability.

The Dutch experience with natural and semi-natural shore-protections indicates that it is nearly always possible to come up with a construction that satisfies the different requirements (i.e., erosion control, environment, and functional uses).

Research is still needed for defining the effectiveness and stability criteria for natural materials (i.e., mussels, etc.) without or in combination with artificial elements.

The policy-analysis method offers a valuable help for making a proper choice of design in cases where various requirements (often contradictory) have to be satisfied.

Due to the diversity of the possible designs and the design criteria involved, it seems worthwhile to co-ordinate the research on erosion control. Closer international cooperation in this field is needed.

---

## 4. CHANGEMENTS DU RÉGIME DE LA RIVIÈRE ET DES TRANSPORTS SOLIDES

---

### 4.1. RETENUES

L'augmentation de l'érosion conduit à un transport plus important de matériaux des rives soumises à l'érosion vers les parties plus profondes de la retenue. L'érosion et le lessivage de minéraux et de matériaux organiques, tels que tourbes, peuvent entraîner la libération de composés chimiques. L'eau de la retenue acquiert ainsi une teneur plus élevée en fer, phosphore, azote, matériaux dissous et matières organiques en suspension. Parfois, ces changements revêtent une grande importance pour la qualité de l'eau et la production biologique, dans les retenues ainsi qu'à l'aval.

Les sédiments étant piégés dans la retenue, les conditions de milieu, au fond du réservoir, peuvent changer par rapport à celles du lac naturel, non régularisé, ou de la rivière. Le dépôt de sédiments affecte la production biologique, le transfert de substances à travers la chaîne alimentaire et la production piscicole. D'un point de vue technique, le problème de la sédimentation dans les retenues est généralement moins important dans les régions aux hivers rigoureux, du fait de la rareté de matériaux susceptibles d'être érodés pendant les périodes de gel.

Les barrages modifient le régime des rivières. Le débit à maintenir dans la rivière dépend des besoins correspondant aux diverses utilisations et exigences de l'environnement (navigation, pêche, préservation de la flore et de la faune, etc.). La quantité d'eau restituée peut servir à améliorer les conditions résultant d'une sécheresse de période de retour choisie (par exemple, 10 ans). Dans les aménagements hydro-électriques, où la majeure partie du débit de la rivière est dérivée dans une galerie d'amenée (parfois de plusieurs dizaines de kilomètres de longueur) vers une usine située sur le cours inférieur, le régime de la rivière est profondément modifié dans le tronçon intermédiaire. Un débit réservé minimal acceptable est souvent exigé pour maintenir au moins une partie de la flore et de la faune originelles. Ces débits réduits affectent le milieu physique et, de là, le biotope, de diverses façons. Par exemple, l'envasement et le gel peuvent perturber la vie aquatique. Dans une certaine mesure, on atténue les perturbations au moyen de la construction de seuils (avec passes à poissons), de l'alevinage et de l'augmentation intermittente des débits réservés.

Du fait de l'alluvionnement de la retenue, la quantité de sédiments transportés par la rivière à l'aval diminue. Il en résulte que l'équilibre érosion-sédimentation est modifié à l'aval du barrage, et peut-être même jusqu'à l'embouchure. L'eau non chargée de matériaux, lâchée à l'aval du barrage, est « affamée » de sédiments et peut éroder le lit de la rivière jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre érosion-charge en sédiments s'établisse. L'effet d'une telle érosion doit être étudié avant l'exécution

---

## 4. CHANGES IN WATERFLOW AND SEDIMENT TRANSPORT

---

### 4.1. RESERVOIRS

As a result of increased erosion, there is more transport of material from the eroded shoreline to deeper parts of the reservoir. Erosion and leaching of minerals and of such organic material as peat bogs may result in the release of chemical compounds. The lake water thereby acquires a higher content of iron, phosphorous, nitrogen, dissolved material, and suspended organic matter. Sometimes these changes are of great importance for water quality and for biological production, both in the reservoirs and downstream.

Due to the trapping of sediment within the reservoir, the environmental conditions in the bottom region may change compared to the conditions in the unregulated, natural lake, or river. Sediment deposition affects primary biological production, transfer of substances through the food chains, and fish production. From a technical point of view, the problem of reservoir sedimentation is usually least in regions with severe winters, due to the scarcity of erodible soils when it is freezing.

By damming up rivers, the waterflow in these rivers changes. The quantity of waterflow to be maintained in the river depends on the quantity needed to satisfy the different functions and aspects (e.g., navigation, fishery, preservation of flora and fauna, etc.). The discharge quantity can be planned to ameliorate conditions due to a drought of some selected return period, say 10 years. In hydro developments in rivers, where most of the water is diverted through tunnels (sometimes several tens of kilometres) to a power station beside the lower river, waterflow is greatly altered in the intervening riverbed. A minimum acceptable compensation flow is often required to maintain at least a part of the original flora and fauna. These diminished flows in the rivers affect the physical environment and, hence, the biota in a number of ways. For example, siltation and freezing of the substrate may cause disturbance to the aquatic life. To some extent, mitigating effects can be achieved through the construction of weirs (with fish passes), the release of hatchery reared fish and the intermittent provision of higher compensation flows.

The sediment transported by the river below a dam diminishes as a result of the sedimentation in the reservoir. As a consequence, the erosion-sedimentation balance is disturbed downstream of the dam, and perhaps to the point where the river flows into the sea. The silt-free water released downstream of the dam is sediment hungry and can cause river channel erosion until it again contains the amount of sediment which is in regime with the local accretion/erosion balance.

de l'aménagement, et la protection du lit et des rives doit être prévue le cas échéant. Des engrais peuvent être nécessaires pour remplacer la perte de limons. A l'embouchure de la rivière, le dépôt de sédiments est parfois inférieur à l'érosion des sédiments par la mer.

Le delta de l'Èbre, en Espagne, fournit un exemple de ce phénomène. Ce delta peut même disparaître puisque la quantité de sédiments qui y est déposée par la rivière est moins élevée que celle enlevée par l'action des vagues et les courants côtiers.

Si les dépôts de sédiments dans un réservoir sont périodiquement évacués au moyen de chasses, on doit étudier l'effet inverse, c'est-à-dire le remblaiement du lit de la rivière à l'aval du barrage. Dans certains cas, un équilibre est obtenu entre la sédimentation et l'érosion, à l'aval, au moyen de chasses périodiques de sédiments. Dans certaines zones le long des rives de la rivière, la réduction de la fréquence des faibles crues, due à la présence de réservoirs à l'amont, entraîne un empiètement de la végétation et des activités humaines sur le lit de la rivière. Lorsque surviennent des crues supérieures à la capacité réduite du lit, des dommages comparables aux conditions existant avant la construction du barrage sont possibles. Un contrôle à long terme du lit à l'aval peut éviter ces problèmes.

### **Régions tropicales et arides**

Dans les régions tropicales et arides, des zones autour d'une retenue présentent parfois une végétation clairsemée à cause du déboisement et de l'exploitation agricole. L'érosion du sol qui en résulte peut entraîner de sérieux problèmes d'alluvionnement du réservoir.

L'expérience acquise sur un grand nombre d'aménagements situés à travers le monde, dans divers environnements, a permis de dégager des principes de base pour les mesures destinées à éviter les effets nuisibles de l'érosion du sol et de la sédimentation. Les mesures agricoles comprennent des méthodes biologiques, telles que la sélection de cultures appropriées, des programmes de rotation des cultures, le labourage suivant des lignes de niveau, l'emblavage par bandes, l'agriculture de conservation, la culture sèche et l'utilisation appropriée d'engrais. Sur des terrains de pente raide, on peut faire face au ruissellement et à l'érosion au moyen d'ouvrages de protection mécanique, tels que : construction de terrasses, levées de terre, drains et canaux de dérivation, rigoles, etc. La plantation de ceintures de forêt en vue de maîtriser l'érosion et d'améliorer l'infiltration constitue souvent une méthode efficace de conservation du sol.

Au Brésil, l'expérience a montré que le reboisement le long des rives des retenues permettait de lutter efficacement contre l'érosion des sols. Un autre avantage est que cela procure des refuges au gibier et aux animaux amphibies, ainsi que des endroits appropriés pour les activités de loisirs. En Espagne, le reboisement du bassin versant de la retenue Beninar fut réalisé en vue de réduire l'érosion. Des mesures plus importantes sont appliquées si des raisons économiques ou écologiques le justifient. Elles comprennent des fossés avec des talus, des terrasses en gradins, des barrages de rétention et d'autres mesures techniques en vue d'empêcher un ruissellement rapide dans les ravines et rigoles.

The impact of such channel erosion must be assessed before implementation of the project, and bed and bank protection must be provided where required. Fertilizer may be required to replace the growth potential of missing silt. At the river mouth, deposition of river sediment may become less than the erosion of sediment by the sea.

An example of this is the delta of the River Ebro in Spain. In fact, this delta may eventually completely disappear, since the amount of the solid material deposited there by the river is less than that which is being carried away by wave action and sea currents.

If sediment deposits in a reservoir are periodically cleared by flushing, the opposite effect of riverbed accretion downstream of the dam may have to be dealt with, at least temporarily. In some cases, a balance can be achieved between downstream silting and scouring by periodic sediment flushing. In some riverine environments, the reduced frequency of lesser flood flows due to upstream reservoirs results in the encroachment of vegetation and of manmade developments on the river channel. When floods greater than the reduced channel capacity occur, damage comparable to pre-dam conditions may be possible. Long term control of the downstream channel condition can avoid these problems.

### **Tropical and arid regions**

In tropical and arid regions, areas around a reservoir can become sparsely vegetated due to deforestation and farming. Subsequent surface erosion can cause severe problems of silting of the reservoir.

Experience from a great number of projects in different environments of the world has formed the basis for measures to avoid negative effects of soil erosion and sedimentation. Agricultural measures include biological methods such as the selection of appropriate crops, crop rotation programmes, contour ploughing, strip cropping, conservation tillage, dry farming, and the proper use of fertilizers. On steeper terrain, runoff and erosion may be ameliorated by mechanical protection works such as terracing, construction of earth ridges, diversion drains and channels, gully control structures, etc. The planting of forest belts to control water runoff and improve infiltration is often an effective form of soil conservation.

In Brazil, experience has shown that reforestation along the reservoir holds back large amounts of eroded soil. As an additional advantage, it gives shelter to game animals and amphibians, and appropriate areas can be used for recreational activities. In Spain, reforestation of the catchment area of the Beninar reservoir was carried out in order to reduce the erosion. More extensive schemes may be applied, if justified for economic or environmental reasons. These include ditches with banks, bench terraces, check dams, and other engineering measures to prevent rapid runoff in rills and gullies.



Pour les lits des rivières, il est nécessaire d'envisager des mesures de protection contre l'érosion. Celles-ci comprennent : fixation de la surface des rives par la végétation naturelle; gabions; tapis de matériaux ou riprap (pierres liées entre elles dans des filets d'acier); ouvrages (murs d'obstacle, pieux) destinés à retarder ou dévier le courant; jetées ou épis. Des méthodes sophistiquées pour la prévision de l'alluvionnement des retenues ont été mises au point, ainsi que des méthodes d'exploitation des retenues destinées à réduire le niveau d'alluvionnement.

En Espagne, au réservoir Beninar, on a construit des digues en matériaux naturels et artificiels pour réduire la vitesse du courant de la rivière, ainsi que trois barrages de rétention des transports solides qui, sans cela, seraient parvenus au réservoir principal.

## **4.2. ESTUAIRES FERMÉS**

Les fermetures du Volkerak et du Haringvliet, dans le sud-ouest des Pays-Bas, datent de 1969 et 1970, respectivement.

Ces fermetures associées à la canalisation du Rhin entraînent des changements importants dans la configuration des courants dans l'estuaire. Ces changements avaient été déterminés préalablement. Des modifications, résultant directement des changements dans les courants, se sont également produites dans la sédimentation et l'érosion des lits des rivières. Certains affluents continueront à subir une érosion, ce qui pourra mettre en danger les rives et les ouvrages hydrauliques. Sur d'autres affluents, il y a une augmentation de la charge en sédiments, ce qui accroît la pollution des lits des rivières.

Après la fermeture du Zuiderzee et la réalisation du Plan Delta, des sables et limons pollués, autrefois transportés vers la Mer du Nord, se déposent maintenant dans les estuaires fermés. Chaque année, 10 000 tonnes environ de métaux lourds se déposent sur les lits des rivières aux Pays-Bas. Ces métaux lourds proviennent essentiellement de la Suisse, de la France et de l'Allemagne et entrent dans le pays avec les eaux du Rhin. Une très faible partie de ces limons pollués est draguée pour maintenir la profondeur des chenaux de navigation; 70 % restent dans le lit de la rivière.

L'augmentation de la pollution du lit de la rivière se heurte à d'autres utilisations de la rivière dans ces zones : nature, loisirs, pêche, fourniture d'eau. La seule solution de ce problème est l'assainissement à la source. Mais cela prendra du temps. Le coût de l'assainissement des lits déjà pollués des rivières et des estuaires peut être estimé grossièrement à 2 milliards de dollars US.

Le dépôt de matériaux transportés par les rivières ou provenant de l'érosion des rivages et des zones de hauts-fonds dans les estuaires fermés n'est pas seulement un problème de pollution, mais affecte également les biotopes dans et sur le lit. Un dépôt continu de limons et de matières organiques entraîne la destruction de ces biotopes.

In river channels, it is necessary to consider methods of protection against river erosion. Such measures include surface armouring of banks by natural vegetation; gabions (artificial network of stones); mattresses or rip-rap (stones bound together in steel nets); and flow retardation or deflection structures in the shape of fencing, piling, or the construction of jetties or groynes. More sophisticated methods to predict reservoir sedimentation are being developed, and methods to operate the reservoirs to decrease the rate of deposition have also been introduced.

In Spain, at the Beninar reservoir, dykes using both man-made and natural materials were built to reduce the speed of the waterflow of the river, and three dams were built creating three retaining reservoirs to retain solid deposits which would otherwise have been carried to the main reservoir.

#### **4.2. DAMMED-UP ESTUARIES**

Closure of the Volkerak and the Haringvliet in the southwest of the Netherlands took place in 1969 and 1970, respectively.

These closures combined with the canalization of the River Rhine caused significant changes in the pattern of the currents in the estuary. These changes had been calculated beforehand. Alterations have also taken place in the sedimentation and in the erosion of the riverbeds as a direct result of the change in currents. Some tributaries will continue to be eroded in the future, which could endanger banks and hydraulic structures. In others, accretion of sediment occurs, which results especially in a growing pollution of the riverbeds.

After damming up the Zuiderzee and the implementation of the Delta project, polluted sand and silt, formerly transported to the North Sea, are now deposited in the dammed-up estuaries. Yearly 10 000 tons of heavy metals are deposited on the Dutch riverbeds. These heavy metals originate mainly from Switzerland, France, and Germany and enter the country with the water of the Rhine. A very small part of this polluted silt is dredged for maintaining navigation depth. Seventy percent stays on the riverbed.

The growing pollution of the riverbed is in conflict with other functions of the river in these areas : nature, recreation, fishery, and water supply. The only solution of this problem is cleaning at the source. But this will take some time. A rough estimate of the costs of cleaning the already polluted river – and estuary – beds is 2 billion US dollars.

The sedimentation of material transported by the rivers or eroded from the shores and shallow areas in the dammed-up estuaries is not only a problem of pollution, but also affects the biotic communities in and on the bed. A continuous deposition of silt and organic material results in the destruction of these communities.

### **Évolution des zones de hauts-fonds**

Au cours de ces dix dernières années, de larges bancs de sable se sont formés parallèlement à la côte, au large des ouvrages de fermeture des estuaires hollandais. Par suite de la disparition des courants de jusant dans les estuaires, des dizaines de millions de mètres cubes de sable se sont déposés sur ces bancs. Ce sable provient de la zone comprise entre 4 et 8 m au-dessous du niveau MSL. Il en résulte que la sécurité côtière est améliorée et que la nature, les pêches, le paysage et les activités de loisirs devront s'adapter à la nouvelle morphologie.



### **Development of shallow areas**

During the last 10 years, broad sand banks have developed parallel to the coast seaward of the closures of the Dutch estuaries. As a result of the disappearance of the ebb current of the estuaries, tens of millions of m<sup>3</sup> of sand have been deposited on these banks. This sand originates from the zone between 4 and 8 m below MSL. As a result, coastal safety is improved and nature, fisheries, landscape and recreation will adjust to the new morphology.

#### Photo 10

Developing sand banks parallel to the coast seaward of the Dutch estuaries which are more or less closed off. Sand bank in front of Veerse Dam.

*Formation de bancs de sable parallèles à la côte, au large des estuaires hollandais plus ou moins fermés. Banc de sable devant le barrage Veerse.*

---

## 5. SÉISMICITÉ INDUITE

---

Les grands barrages et réservoirs peuvent induire des déformations dans les couches sous-jacentes. Ces déformations peuvent se manifester soudainement, provoquant des séismes, ou évoluer lentement sous forme de petits mouvements à long terme.

### 5.1. MOUVEMENTS ÉLASTIQUES ET ÉLASTO-PLASTIQUES À LONG TERME

De faibles mouvements à long terme ont été mesurés dans les fondations rocheuses de deux barrages en enrochement, en Suède. Les barrages sont situés dans une région où l'activité sismique est très faible. Mais, en raison de la dernière glaciation, le bedrock est soumis à un soulèvement à long terme. Ce mouvement risque de provoquer des fuites à travers les fondations des barrages.

Au barrage Messaure, les fouilles de 60 m de profondeur exécutées dans le terrain de couverture en vue de fonder la partie principale du barrage sur le bedrock, causèrent un soulèvement atteignant 9 cm environ. Le soulèvement s'arrêta lorsque la hauteur du remblai du barrage dépassa la profondeur des fouilles. Toutefois, le tassement ne compensa pas le soulèvement total. Le principal problème résultant du soulèvement de la roche est le risque d'une augmentation des fuites à travers la fondation. Ce risque peut être éliminé, en grande partie, par des injections supplémentaires. Si cette mesure est mise en œuvre lorsque le soulèvement a atteint son maximum, le tassement ultérieur à long terme de la fondation contribuera à l'obtention d'un bon résultat.

Des mouvements périodiques, dus à la variation du niveau de la retenue, ont été mesurés dans la fondation rocheuse du barrage Seitevare. Il s'agit d'un barrage régulateur où le niveau de retenue varie annuellement dans une tranche maximale de 34,5 m. Cela provoque un mouvement vertical périodique de 0,5 à 1 cm environ dans la fondation du barrage. Dans ce cas, l'effet des injections est douteux, du fait que les diaclases de la roche s'ouvrent à chaque variation cyclique du niveau de retenue. Aussi, si un tel mouvement du rocher de fondation est prévu, le drainage de la zone aval doit-il être efficace pour maintenir la stabilité du barrage.

### 5.2. SÉISMES INDUITS

Le remplissage d'une retenue conduit à d'importants changements dans les couches de fondation. Des micro-séismes ou même des séismes dommageables peuvent en résulter. Le risque de tels séismes dépend des conditions sismo-tectoniques locales et de la profondeur du réservoir.

---

## 5. INDUCED SEISMICITY

---

Large dams and reservoirs may cause strains in their underlying strata. These strains may be released suddenly, inducing earthquakes, or occur slowly as small long-term movements.

### 5.1. ELASTIC AND ELASTO-PLASTIC LONG-TERM MOVEMENTS

Small long-term movements have been measured in the rock foundation beneath two rockfill dams in Sweden. The dams are located in a region where the seismic activity is very low. But as a result of the last glaciation, the bedrock is subjected to long-term heave. These movements give risks of leakage in the foundations of the dams.

At Messaure Dam, the excavation of 60 m of overburden, necessary to found the main part of the dam on bedrock, caused heave of about 9 cm maximum. The heave stopped when the height of damfill exceeded the depth of excavation. The settlement, however, did not compensate the total heave. The main problem caused by rock heave is the risk for an increase of leakage in the foundation. To a great extent, this risk can be eliminated by supplementary grouting. If this remedy is carried out when the heave was reached its maximum, the following long-term settlement of the foundations will contribute to a good result.

Periodic movements in the rock foundation caused by variation of the reservoir level have been measured at Seitevare Dam. It is a regulation dam where the reservoir level varies annually within a range of maximum 34.5 m. This causes a periodic vertical movement of a magnitude of about 0.5 cm to 1 cm in the foundation of the dam. This will lead to an increase of the permeability of the foundation. The effect of grouting in this case is doubtful since the rock joints will be opened with every cyclic change of the water level. Therefore, if this type of rock movement is to be expected, the drainage conditions of the downstream area must be good to maintain the stability of the dam.

### 5.2. INDUCED EARTHQUAKES

Water impoundment brings about considerable changes in the foundation strata. This may cause micro-earthquakes or even a damaging earthquake. Whether or not a damaging earthquake is induced depends on the local seismotectonic conditions and the height of the reservoir.

### 5.2.1. Catégories de phénomènes sismiques

L'expérience a conduit à classer les phénomènes sismiques survenant à proximité de retenues en trois catégories :

1. Il n'y a pas de changement dans l'activité sismique.
2. Des micro-séismes (M 2) se produisent. Leur fréquence d'occurrence augmente avec la montée du niveau de retenue. Une fois le niveau normal de retenue atteint, leur nombre augmente ou diminue suivant la variation du plan d'eau, ou après des périodes de plusieurs jours. Éventuellement, les secousses se calment.
3. Des micro-séismes se produisent et leur fréquence d'occurrence augmente nettement lorsque la hauteur d'eau dans la retenue atteint un seuil, souvent de l'ordre de 100 m (\*) mais descendant parfois à 40 m environ. Un second critère est également souvent cité : 1 km<sup>3</sup> de volume d'eau stocké.

Immédiatement après ces phénomènes, des séismes plus forts (moyens), de magnitude 3 à 5, peuvent se manifester. La magnitude 5 est rarement dépassée. Lorsque cette période a pris fin, des micro-séismes peuvent de nouveau se produire puis disparaître.

La troisième catégorie mérite le plus d'attention, les deux premières ne posant pas de problèmes.

Les caractéristiques générales des séismes induits sont les suivantes :

- ils surviennent dans une zone proche des retenues;
- leurs foyers sont peu profonds;
- la fréquence des faibles séismes est plus élevée que celle des forts séismes;
- le risque d'apparition de séismes est plus grand dans une zone de failles normales ou latérales;
- la direction de la ligne nodale du mouvement initial coïncide grosso modo avec celle d'un séisme naturel.

Des séismes de magnitude moyenne surviennent principalement si la charge appliquée est grande et le volume d'eau stocké important. Un autre facteur significatif peut être la présence de nombreuses fissures et failles dans la croûte terrestre, conduisant à une augmentation des pressions interstitielles sur une vaste zone. Des séismes induits peuvent survenir quelques jours après le remplissage (Kremastar, Grèce), un an ou plus après (Koyna, Inde; Hsinfenkiang, Chine), ou 17 ans après (Assouan, Égypte).

Des séismes induits ont été observés dans tous types de terrains rocheux, même dans des terrains faiblement consolidés (Mangla, Pakistan).

### 5.2.2. Théories des séismes induits

Il n'y a pas d'accord sur la théorie du mécanisme des séismes induits par les retenues. Les explications qualitatives suivantes sont généralement admises.

---

(\*) De nombreux auteurs indiquent ce chiffre. Notre collègue espagnol, Angel Perez Saiz, attire notre attention sur quelques exceptions, en particulier le barrage Canarillas de 36 m de hauteur.

### 5.2.1. Categories of earthquake phenomena

According to experience earthquake phenomena occurring in the vicinity of reservoirs may be divided into three categories.

1. No change in seismic activity.

2. Micro-earthquakes (M 2) occur. The frequency of occurrence increases with the rise of water level. After reaching high-water level, the number increases and decreases according to water level variation, or after intervals of several days. Eventually the tremors subside.

3. Micro-earthquakes occur and the frequency of occurrence increases sharply when the depth of water reaches a threshold value, often of the order of 100 m (\*), but sometimes as low as about 40 m. A second criterion of 1 km<sup>3</sup> of stored water is also often quoted.

Immediately after this, stronger (medium) sized earthquakes of magnitude 3 to 5 may occur. Infrequently the magnitude 5 is exceeded. When this period has ended, micro-earthquakes occur again and eventually will cease.

The third category is of the most interest, the first two not being problems at present.

The general characteristics of induced earthquakes are :

- occurrence within a distance not far from the reservoirs;
- small focal depths;
- the frequency of small earthquakes is higher than of large earthquakes;
- chance of occurrence high in an area of normal or lateral faults;
  
- the direction of the nodal line of initial movement roughly coincides with that of a natural earthquake.

Medium-sized earthquakes occur mostly if the applied head is large and the water impoundment volume is considerable. Another significant factor can be the presence of many fissures and faults in the crust and the ensuing rise in pore water pressure which occurs over a wide area. Induced earthquakes can occur some days after the impoundment (Kremastar, Greece), a year or more (Koyna, India; Hsin-fenkiang, China), or 17 years (Aswan, Egypt).

Induced earthquakes occurred in all types of rocky soil, even in slightly cemented soil (Mangla dam, Pakistan).

### 5.2.2. Theories on induced earthquakes

There is no agreed theory on the mechanism of earthquakes induced by the storage of water. The following qualitative explanations are generally supported.

---

(\*) Many authors quote this number. Our Spanish colleague, Angel Perez Saiz, draws our attention to some exceptions including the 36-m-high Canarillas Dam.



Le niveau d'eau de la retenue fait monter le niveau de la nappe phréatique dans la zone avoisinante. Cette augmentation de hauteur d'eau conduit à une croissance de pression interstitielle à l'intérieur de la roche, de la croûte terrestre. Cela peut provoquer des ruptures à l'intérieur de la roche, se manifestant sous la forme de micro-séismes. Les effets des augmentations de charge d'eau et de pression interstitielle dues au réservoir varient considérablement dans l'espace et dans le temps suivant la perméabilité de la croûte terrestre, la présence de failles, etc.

Dans de rares situations, de faibles modifications de contrainte ou de résistance de la roche, causées par le poids de l'eau et les variations de pression interstitielle, peuvent déclencher la libération d'une grande quantité d'énergie déjà présente. On admet généralement que les séismes induits, d'intensité moyenne ou plus grande, résultent de ce phénomène de détente.

Cependant, aucune théorie n'a été établie sur le mécanisme des séismes induits par les retenues. Aussi, des recherches supplémentaires sont-elles nécessaires pour expliquer les facteurs et les mécanismes. D'autres causes de déclenchement peuvent être des changements de température de l'air, de pression atmosphérique ou de niveau de la mer. Il est largement admis que les séismes induits sont de moindre importance que les phénomènes d'origine naturelle, mais que la fréquence est augmentée ce qui avance dans le temps la manifestation de certains séismes.

Un rapport de Vladut (1988) traite d'une méthode mise au point pour évaluer le risque potentiel de sismicité induite par les retenues. Le modèle de prévision du risque fut appliqué avec succès à deux réservoirs canadiens.

### **5.2.3. Occurrence des séismes induits**

Le rapport de G. A. Beacher, publié en 1982, recense 234 grandes retenues d'une profondeur d'eau supérieure ou égale à 92 m et d'une capacité supérieure à 1 km<sup>3</sup>. Sur 29 de ces réservoirs (soit 12,4 %), des séismes induits ont été enregistrés.

Shunzo Okamoto a étudié l'occurrence de séismes induits sur 22 barrages de grande hauteur (plus de 100 m) au Japon. Cette étude a permis de conclure qu'aucun séisme dommageable n'a été induit par le remplissage de retenues, au Japon, bien que ce pays se trouve dans une zone de forte activité sismique. Cependant, des séismes dommageables en relation avec le remplissage de retenues ont été observés dans d'autres pays; il faut noter que ces séismes ne se sont pas toujours produits dans les zones de forte sismicité du monde.

### **5.2.4. Mesures de surveillance**

Dans les zones où le moindre risque de séisme induit se présente, on ne doit pas être pris au dépourvu. Des signes prémonitoires sont : une augmentation soudaine du nombre des micro-séismes et des changements de la répartition des foyers. Il est donc nécessaire d'installer suffisamment tôt un réseau d'observations capable de détecter ces modifications (emplacement du foyer, moment de l'apparition du phénomène, etc.). Les appareils de mesure devront être précis et faciles à manipuler. Les observations devront commencer avant le remplissage de la retenue et se poursuivre pendant plusieurs années après la mise en eau. La meilleure méthode est de commencer la surveillance de l'activité micro-sismique avant la construction.

With the water level inside the reservoir, the groundwater level in the surroundings rises. That increased height of water will cause a rise in pore water pressure inside the rock, earth's crust. This may cause failures inside the rock, felt as micro-earthquakes. The influences of increases in weight of water and rises in pore water pressure due to water storage differ considerably location-wise and time-wise depending on the permeability of the crust, existence of faults, etc.

As a rare case, slight changes in stress or rock strength caused by the weight of the water and changes in the pore water pressure can serve as a trigger to cause release of a large amount of energy already present. It is generally considered that induced earthquakes of medium scale and larger are induced by this trigger action.

However, there is no established theory on the mechanism of earthquakes induced by the storage of water. Therefore, more research is necessary to explain the factors and mechanisms. Other triggers may be changes in air temperature, atmospheric pressure, or sea level. There is a wide acceptance that induced earthquakes are less than naturally occurring events, but that frequency is increased thus bringing forward in time some earthquakes events.

A paper by Vladut (1988) discusses a process which has been developed to evaluate the potential risk for reservoir-induced seismicity. The Risk Prediction Model was successfully applied to two Canadian reservoirs.

### **5.2.3. Occurrence of induced earthquakes**

According to a paper by G. A. Beacher, published in 1982, there are 234 large reservoirs with a water depth of 92 m or more and with a storage capacity of more than one billion tons (1 km<sup>3</sup>). At 29 of these reservoirs (corresponding to 12.4 percent), induced earthquakes have been reported.

Shunzo Okamoto investigated the occurrence of induced earthquakes at 22 high dams (100 m +) in Japan. The conclusion of this investigation is that no damaging earthquakes have been induced by water impoundment in Japan, notwithstanding the fact that Japan lies in an area with severe earthquake activity. However, damaging earthquakes in relation to the filling of reservoirs have been reported from elsewhere; it must be noted that these earthquakes did not always occur in the severe earthquake zones of the world.

### **5.2.4. Measures by the construction engineer**

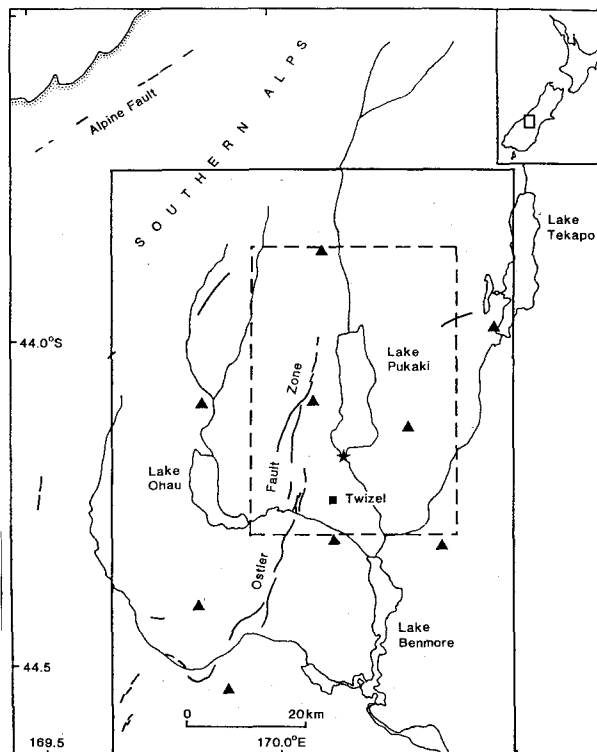
In areas where one expects only the slightest chance of an induced earthquake, one must be prepared. Preliminary signs are a sudden increase in the number of micro-earthquakes and changes in foci distribution. Therefore, it is necessary to install beforehand an observation network capable of catching these changes (location of focus, time of occurrence, etc.). The instruments should be precision types and easy to handle. The observations should preferably begin before the impoundment and be continued for several years after filling. The best method is to start in the survey stage to observe micro-earthquake activity before building.

En plus du contrôle précis de la sismicité, Angel Perez Saiz (Espagne) recommande de mesurer les tensions lithostatiques (contraintes initiales dans la roche *in situ*) en divers points dans la zone la plus profonde du futur réservoir.

### 5.2.5. Recherches nécessaires

Une solution fondamentale du problème ne peut être obtenue en observant simplement la corrélation entre l'occurrence des séismes et le niveau de retenue, et en faisant des comparaisons statistiques. On trouvera la solution en mettant au point une méthode permettant de connaître en détail les conditions géologiques de la croûte terrestre et la situation des eaux souterraines jusqu'à une profondeur d'au moins 3 km, et en déterminant les conditions de rupture dans la croûte à partir de ces données géologiques et aquifères. Cela nécessitera beaucoup de temps et d'efforts, mais les grandes retenues dont on aura besoin dans l'avenir rendent indispensable une telle étude pratique.

A ce propos, la préparation et l'exécution soignées des mesures autour du lac Pukaki, en Nouvelle-Zélande, méritent d'être mentionnées. En analysant les résultats, Martin Reyners a mis en évidence les effets de la diffusion des pressions interstitielles sur la sismicité induite. Ses constatations sont basées sur huit sismomètres à composante verticale 1-Hz, couvrant une zone de 80 km x 50 km autour



In addition to the proper seismic monitoring, Angel Perez Saiz (Spain) advises to measure the lithostatic (or initial) tensions (*in situ* rock stresses) at various points in the deepest part of the future reservoir.

#### 5.2.5. Necessary research

A fundamental solution to the problem cannot be obtained by merely observing the correlation between earthquake occurrence and reservoir water level and making statistical comparisons. The fundamental solution will be found by developing a suitable method for grasping in detail the geological conditions of the earth's crust, the condition of the groundwater to a depth of at least 3 km, and determining the conditions for failure in the crust by duplicating these conditions above ground. This will take a lot of time and effort but the large reservoirs necessary in the future will make such practical research essential.

In this respect, the careful preparation and execution of the measurements around Lake Pukaki in New Zealand are worth mentioning. Martin Reyners shows in analyzing the results new evidence of the effects of pore pressure diffusion on induced seismicity. His findings are based on eight 1-Hz vertical-component seismometers covering an area of 80 by 50 km around Lake Pukaki. In a region of 100

Fig. 4

Locality map showing seismograph stations of the Pukaki microearthquake network (▲) and the Pukaki High Dam (★) (New Zealand). The box enclosing the stations outlines the area of surveillance of the network, while the dashed box outlines the lake area. Heavy lines denote mapped Late Quaternary fault traces.

Carte indiquant la situation des sismographes du réseau de surveillance des micro-séismes de Pukaki (▲) et l'emplacement du barrage Pukaki (★) (Nouvelle-Zélande). Le cadre en ligne continue délimite la zone de surveillance du réseau, le cadre en tirets indique la zone de la retenue. Les lignes épaisses représentent les traces de failles du Quaternaire récent.

du lac Pukaki. Dans une région de  $100 \text{ km} \times 125 \text{ km}$ , 2 825 séismes de magnitude 0,8 furent observés au cours d'une période de 3 078 jours. Le séisme maximal de magnitude 4,6 survint, en décembre 1978, au cours d'un remplissage rapide de la retenue. Dans le cas le plus défavorable, un réservoir perché comme Pukaki conduit à une augmentation de pression interstitielle égale à la somme de la profondeur du réservoir et de la profondeur jusqu'à la nappe phréatique. Cela peut conduire à une importante perte de résistance. La rupture avec décrochement, qui prédomine dans la région, ne peut pas être déclenchée par la charge ajoutée du réservoir mais seulement par une augmentation de pression interstitielle.

Dans une retenue dont le fond est imperméable, la pression interstitielle initialement induite se diffuse normalement et un remplissage suffisamment lent de la retenue peut éviter toute perte de résistance. A l'inverse, sous un réservoir perméable, l'affaiblissement initial se maintient, ou est suivi d'un autre affaiblissement. L'étude faite à Pukaki montre l'importance de la surveillance des niveaux de la nappe phréatique, de façon à obtenir une vue étendue sur les changements dans cette nappe.

by 125 km, 2 825 earthquakes of M 0.8 occurred in a period of 3 078 days. The largest event was the ML = 4.6 Pukaki earthquake of December 1978 while the lake was filling rapidly. In the worst case, a perched reservoir like Pukaki leads to an increase in pore pressure of the sum of the reservoir depth plus the depth to the fault plane. This can lead to major weakening. The strike-slip failure that dominates the region cannot be triggered by the added load of the reservoir but only by a rise in pore pressure.

In a reservoir with an impervious bottom, the initially induced pore pressure normally diffuses away, and sufficiently slow impounding may prevent any weakening. In contrast, beneath a permeable reservoir, the initial weakening either remains constant or is followed by further weakening. The Pukaki study shows the importance of monitoring groundwater levels in such a way that an areal extent of the groundwater change can be obtained.

---

## 6. REFERENCES

---

### 6.1. ICOLD BULLETINS / BULLETINS CIGB

- Dams and the environment, Bulletin 35, ICOLD, 1980 / Les barrages et l'environnement, Bulletin 35, CIGB, 1980.
- Dam projects and environmental success, Bulletin 37, ICOLD, 1981 / Une réussite, les barrages et l'écologie, Bulletin 37, CIGB, 1981.
- Dams and the environment - Notes on regional influences, Bulletin 50, ICOLD, 1985 / Barrages et environnement - Notes sur les influences régionales, Bulletin 50, CIGB, 1985.
- Dams and environment - Case histories, Bulletin 65, ICOLD, 1988 / Barrages et environnement - Exemples vécus, Bulletin 65, CIGB, 1988.
- Dams and environment - The Zuiderzee damming, Bulletin 66, ICOLD, 1989 / Barrages et environnement - La fermeture du Zuiderzee, Bulletin 66, CIGB, 1989.
- Dams and environment - Socio-economic impacts, Bulletin 86, ICOLD, 1992 / Barrages et environnement - Effets socio-économiques, Bulletin 86, CIGB, 1992.

### 6.2. RECLAMATION AND DRAINAGE / DÉFRICHEMENT ET DRAINAGE DE LA ZONE DE RETENUE

#### Clearing of dammed areas / Défrichage de la zone de retenue

- ASHTON, P. J., 1987. The pros and cons of bush clearing in new dam basins : Consequences for aquatic habitats. National Institute for Water Research, CSIR, Pretoria.
- BUDWEG, F. M. G., 1980. Environmental engineering for dams and reservoirs in Brazil. In : Water Power and Dam Construction, p. 19-23, October 1980.
- CAMBRAY, J. A., 1987. Clearance policy considerations. Albany Muse-am, Grahamstown, RSA.
- MITCHELL, D. S. (Ed.), 1974. Aquatic vegetation and its use and control. UNESCO, Paris.
- POLSKEY, G. R., 1985. Impacts of terrestrial vegetation preimpoundment clearing on reservoir ecology and fisheries in the USA and Canada. FAO Fish. Tech. Pap (258), 35 p.
- SKELTON, P. H., 1987. Bush clearing of prospective damsites a fish and fisheries perspective. J. L. B. Smith Institute of Ichthyology, Grahamstown, RSA.

### **3. SLOPE STABILITY / STABILITÉ DES VERSANTS**

#### **eservoir shoreline protection / Protection des rives de la retenue**

SUNDBORG A., ALV - KRAFT - MILJO (RIVER - HYDRO POWER - ENVIRONMENT). Solna 1977 (in Swedish with an English summary).

#### **landslides / Glissements de terrain**

MYLREA, F. H. *et al.*, 1978. Stability of reservoir slopes. A paper presented during a symposium on the Mica Project. Proceedings of the American Power Conference, V 40, 1978.

Electricity Corporation of New Zealand Limited, Electricorp Production, July 1989. Cromwell Gorge landslides.

GILLON, M. D., HANCOX, G. T., 1992. Cromwell Gorge landslides - A general overview. Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand.

GILLON, M. D., DENTON, B. N., MACFARLANE, D. F., 1992. Field investigation of the Cromwell Gorge landslides. Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand.

MACFARLANE, D. F., PATTLE, A. D., SALT, G., 1992. Nature and identification of groundwater systems of the Cromwell Gorge landslides. Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand.

GILLON, M. D., FOSTER, P. F., PROFFITT, G. T., SMITS, A. P., 1992. Monitoring of the Cromwell Gorge landslides. Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand.

#### **dammed-up estuary shoreline protection / Protection des rives d'estuaires fermés**

PILARCZYK, K. W., MISDORP, R., LEWIS, R. J. and VISSER, J., 1986. Strategy to erosion control of Dutch estuaries. Proceedings on the Third International Symposium on River Sedimentation, April 1986, Mississippi, USA, p. 963-983.

### **4. CHANGES IN WATERFLOW AND SEDIMENT TRANSPORT / CHANGEMENTS DU RÉGIME DE LA RIVIÈRE ET DES TRANSPORTS SOLIDES**

#### **eservoirs / Retenues**

GUOPING, Wu. Highlights of environmental issues of Three Gorge Project. Report 53, Question 60, International Commission on Large Dams, Sixteenth Congress, San Francisco, California, 1988; Congress Proceedings, ICOLD, Paris, France.

RAMBAUD, J., *et al.* Expérience acquise dans les vidanges de retenues par Électricité de France et La Compagnie Nationale du Rhône. Report 30, Question 60, International Commission on Large Dams, Sixteenth Congress, San Francisco, California, 1988; Congress Proceedings, ICOLD, Paris, France.



- LJUBOMIR VAJDA, N.J. and PEKOVIC SAVA. Influences of reservoirs sedimentation and flushing on environment. Report 47, Question 60, International Commission on Large Dams, Sixteenth Congress, San Francisco, California, 1988; Congress Proceedings, ICOLD, Paris, France.

#### **River Basins / Bassins fluviaux**

- SUNDBORG, A. and WHITE, W.R. Eds., 1982. Sedimentation problems in riverbasins, Studies and Reports in Hydrology, 35 (UNESCO, Paris, 1982).
- RAPP, A., BERRY, L., and TEMPLE, P.H., Eds. 1972; Geografiska Annaler, 3 (Stockholm, 1972, in English).
- SUNDBORG, A., 1983. Nature and Resources (UNESCO, Paris, 1983, in English, French and Spanish).
- SUNDBORG, A., 1986. Journal of Water Resources, 5 (Bagdad, 1986).
- WILLIAMS, G.P. and WOLMAN, M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Professional Papers 1286 (US Geological Survey, Washington DC, 1984).

#### **Dammed-up estuaries / Estuaires fermés**

- IJEDEMA, C. W., 1989. Hydro-ecological relations in the Delta waters of the south-west Netherlands. In : Hydro-ecological relations in the Delta Water of the South-West Netherlands. Proceedings and information No. 41. Technical Meeting 46 Rotterdam, The Netherlands, 1989. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague.
- BIJLSMA, L. and KUIPERS, J. W. M., 1989. River water and the quality of the delta-waters. In : Hydro-ecological relations in the Delta Water of the South-West Netherlands. Proceedings and information No. 41. Technical Meeting 46 Rotterdam, The Netherlands, 1989. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague.
- MULDER, J. P. M., 1989. The changing tidal landscape in the delta area of the south-west Netherlands. In : Hydro-ecological relations in the Delta Water of the South-West Netherlands. Proceedings and information No. 41. Technical Meeting 46 Rotterdam, The Netherlands, 1989. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague.

### **6.5. INDUCED SEISMICITY/SÉISMICITÉ INDUITE**

- GUPTA, H. K., 1985. The present status of reservoir induced seismicity investigations with special emphasis on Koyna earthquakes. Tectonophysics 118 (1985) 257-279 Elseviers Science Publishers B. V. Amsterdam.
- REYNERS, M., 1988. Reservoir induced seismicity at Lake Pukaki, New Zealand. Geophysical Journal (1988) 93, 127-135.
- International Symposium on Earthquakes and Dams, Vol. 1, 20 May 1987, Beijing, China.

BERNELL, L., and SHERMAN, K. A., 1979. Long-term movements in rock foundation beneath two rockfill dams. Swedish State Power Board. Thirteenth International Congress on Large Dams, New Delhi, 1979. Question 51, Report 8. Published by the International Commission on Large Dam, Paris, France.

BEACHER, G. B. and KEENEY, R. L. Statistical examination of reservoir induced seismicity. Bull. of Seismological Society of America, Vol. 72, No. 2, 1982.

VLADUT, Thomas. Approaches to the mitigation of reservoir-induced seismicity hazards in environmental impact assessment. Report 40, Question 60, International Commission on Large Dams, Sixteenth Congress, San Francisco, California, USA, 1988; Congress Proceedings, ICOLD, Paris, France.

HAWS, E. T. & REILLY N., 1980. Dams, natural and induced earthquakes and the environment. Conference on Design of Dams to Resist Earthquakes, London, 1980.

Imprimerie de Montligeon  
61400 La Chapelle Montligeon  
Dépôt légal : avril 1993  
N° 16390  
ISSN 1534-8293  
Couverture : Olivier Magna

***Copyright © ICOLD - CIGB***

*Archives informatisées en ligne*



*Computerized Archives on line*

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



---

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