

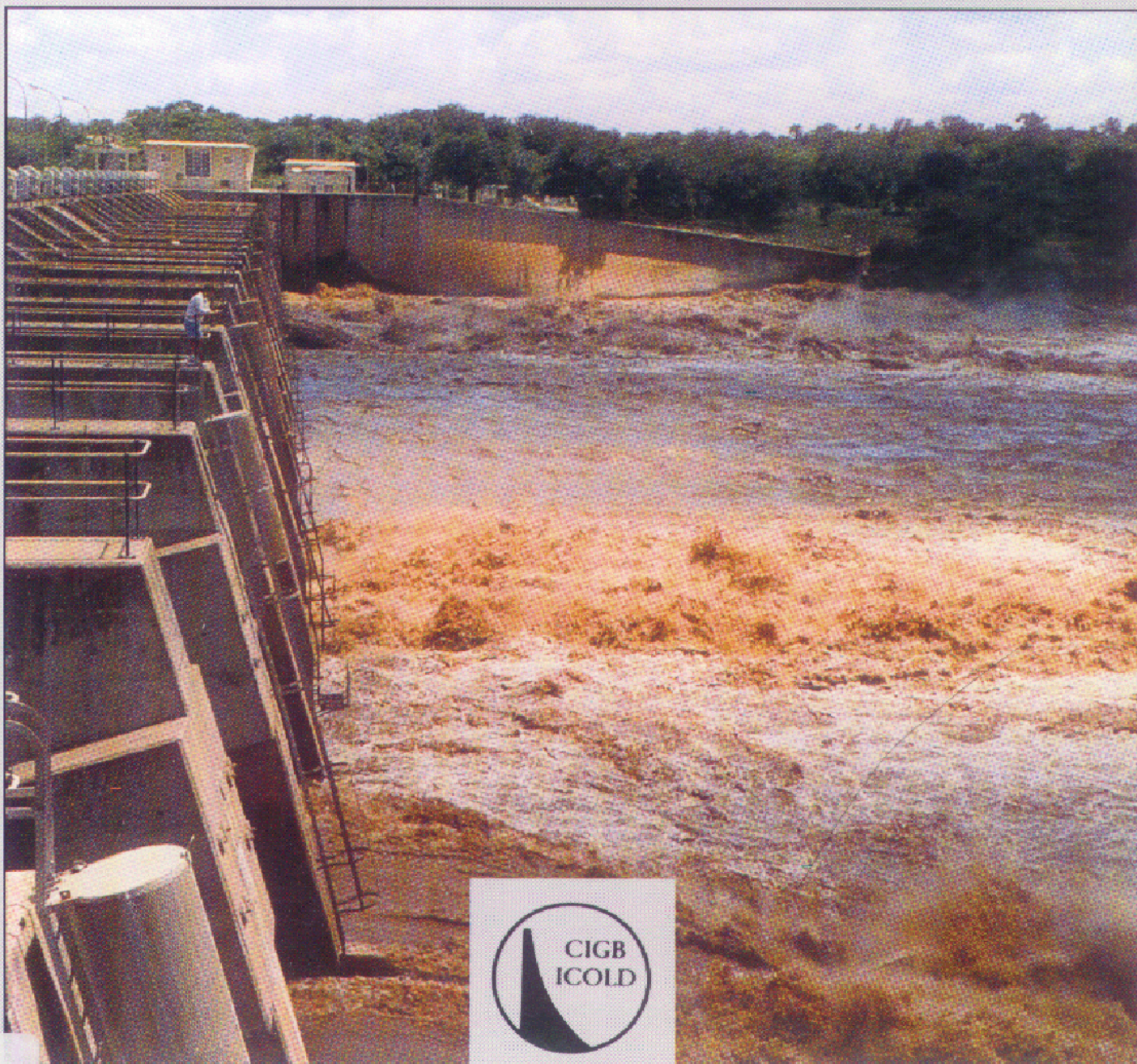
DEALING WITH RESERVOIR SEDIMENTATION

Guidelines and case studies

GESTION DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES

Recommandations et exemples

Bulletin 115



1999

Cover photograph
Phalaborwa Barrage on the Olifants River, South Africa,
during flood flushing of sediment at a discharge of 900 cumec, February 1996

Photo de couverture
Barrage Phalaborwa sur la rivière Olifants, Afrique du Sud,
au cours d'une chasse de sédiments (débit de crue évacué 900 m³/s - février 1996)

This Bulletin has been written by Prof. G. R. Basson and Prof A. Rooseboom
on behalf of the South African Committee on Large Dams

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

Ce Bulletin a été rédigé par Prof. G. R. Basson et Prof. A. Rooseboom
au nom du Comité National Sud-Africain des Grands Barrages.

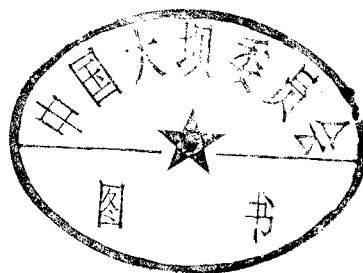
Texte original en anglais - Traduction en français par Y. Le May

DEALING WITH RESERVOIR SEDIMENTATION

Guidelines and case studies

GESTION DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES

Recommandations et exemples



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

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 SEDIMENTATION OF RESERVOIRS
COMITÉ DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES (*)
(1990 - 1996) (1996 - 1998)

Chairman/Président

USA/États-Unis R.I. STRAND

Members/Membres

Algeria/Algérie	K. BELBACHIR
China/Chine	Z. WANG
Egypt/Égypte	A. EL MAGUID
France	C. TERRIER
Germany/Allemagne	B. WESTRICH
India/Inde	R.S. SACHADEVA
Indonesia/Indonésie	S. ATMAKUSUMA
Iran	J. FARHOUDI
Italy/Italie	R. PAOLINA
Japan/Japon	T. MORIMOTO
Korea/Corée (ROK)	Y.N. YOON
Nepal	
Netherlands/Pays-Bas	C. STIGTER
Pakistan	A.K. KHAN
Poland/Pologne	S.L. DABKOWSKI
South Africa/Afrique du Sud	A. ROOSEBOOM
Spain/Espagne	F. MENDAÑA
Turkey/Turquie	M. ORHON
Zimbabwe	T.C. KABELL

(*) Membership in 1996
Composition en 1996

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. RÉDUCTION DES APPORTS SOLIDES GRÂCE À LA GESTION DU BASSIN VERSANT
 3. TRAVERSÉE DES RETENUES PAR LES APPORTS SOLIDES
 4. ENLÈVEMENT DES DÉPÔTS DE SÉDIMENTS ACCUMULÉS DANS LES RETENUES
 5. MESURES DESTINÉES À COMPENSER L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES
 6. ÉTUDE SUR MODÈLES DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES
 7. CONCEPTION DES ÉVACUATEURS DE FOND POUR LES OPÉRATIONS DE LÂCHURE/CHASSE
 8. PROJET ET UTILISATION DE RESSOURCES EN EAU : MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT
 9. RECOMMANDATIONS
 10. RÉFÉRENCES

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. REDUCTION OF SEDIMENT YIELDS THROUGH WATERSHED MANAGEMENT
 3. PASSING INCOMING SEDIMENTS THROUGH RESERVOIRS
 4. REMOVAL OF ACCUMULATED SEDIMENT DEPOSITS
 5. MEASURES TO COMPENSATE FOR RESERVOIR SEDIMENTATION
 6. RESERVOIR SEDIMENTATION MODELLING
 7. THE DESIGN OF OUTLETS FOR SLUICING/FLUSHING OPERATIONS
 8. WATER RESOURCES PLANNING AND DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION CONTROL
 9. RECOMMENDATIONS
 10. REFERENCES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. INTRODUCTION	12
2. RÉDUCTION DES APPORTS SOLIDES GRÂCE À LA GESTION DU BASSIN VERSANT	16
2.1. Généralités	16
2.2. Conservation du sol et de l'eau	16
2.3. Dérivation des eaux chargées de sédiments pour l'agriculture	22
2.4. Barrages de captage des sédiments à l'amont	22
2.5. Rideaux de végétation.....	22
2.6. Dérivation des sédiments.....	24
2.7. Retenue de stockage en dehors du lit de la rivière.....	26
3. TRAVERSÉE DES RETENUES PAR LES APPORTS SOLIDES	28
3.1. Lâchures.....	28
3.1.1. Généralités	28
3.1.2. Conditions aux limites.....	30
3.1.3. Conception des opérations de lâchure	30
3.1.4. Exemples.....	32
3.2. Évacuation par courants de densité	34
3.2.1. Généralités	34
3.2.2. Conditions aux limites.....	36
3.2.3. Méthode de calcul des courants de densité	38
3.2.4. Exemples.....	42
4. ENLÈVEMENT DES DÉPÔTS DE SÉDIMENTS ACCUMULÉS DANS LES RETENUES	46
4.1. Chasse	46
4.1.1. Généralités	46
4.1.2. Conditions aux limites.....	46
4.1.3. Méthode de calcul des opérations de chasse	52
4.1.4. Exemples.....	56
4.2. Excavation des sédiments	58
4.2.1. Généralités	58
4.2.2. Dragage des retenues - Conditions aux limites.....	58

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD.....	11
1. INTRODUCTION	13
2. REDUCTION OF SEDIMENT YIELDS THROUGH WATERSHED MANAGEMENT	17
2.1. General	17
2.2. Soil and water conservation.....	17
2.3. Diversion of sediment-laden flow for agriculture.....	23
2.4. Upstream sediment trapping (debris or check) dams	23
2.5. Vegetation screens.....	23
2.6. Bypassing of sediment.....	25
2.7. Off-stream storage	27
3. PASSING INCOMING SEDIMENTS THROUGH RESERVOIRS.....	29
3.1. Sluicing.....	29
3.1.1. General	29
3.1.2. Boundary conditions	31
3.1.3. Sluicing operation design procedure	31
3.1.4. Case studies	33
3.2. Venting of density currents	35
3.2.1. General	35
3.2.2. Boundary conditions	37
3.2.3. Density current calculation procedure.....	39
3.2.4. Case studies	43
4. REMOVAL OF ACCUMULATED SEDIMENT DEPOSITS	47
4.1. Flushing.....	47
4.1.1. General	47
4.1.2. Boundary conditions	47
4.1.3. Flushing operation calculation procedure	53
4.1.4. Case studies	57
4.2. Excavation of sediment.....	59
4.2.1. General	59
4.2.2. Reservoir dredging boundary conditions.....	59

4.2.3. Choix du matériel de dragage	62
4.2.4. Considérations générales relatives au dragage des retenues.....	64
4.2.5. Exemples.....	64
5. MESURES DESTINÉES À COMPENSER L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES.....	68
5.1. Surélévation du barrage.....	68
5.2. Construction de nouveaux barrages.....	68
5.3. Conception pour tenir compte de l'alluvionnement.....	68
5.4. Transfert d'eau depuis des bassins versants adjacents.....	70
6. ÉTUDE SUR MODÈLES DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES.....	72
6.1. Relations empiriques.....	72
6.2. Modèles mathématiques.....	72
6.3. Modèles physiques.....	76
7. CONCEPTION DES ÉVACUATEURS DE FOND POUR LES OPÉRATIONS DE LÂCHURE/CHASSE.....	78
7.1. Généralités.....	78
7.2. Capacité de débit des évacuateurs de fond.....	78
7.3. Dispositions générales des évacuateurs de fond.....	80
7.4. Obstruction des évacuateurs de fond.....	82
7.5. Abrasion.....	84
8. PROJET ET UTILISATION DE RESSOURCES EN EAU : MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT.....	86
8.1. Choix du site du barrage.....	86
8.2. Choix des techniques de maîtrise de l'alluvionnement.....	86
9. RECOMMANDATIONS.....	94
10. RÉFÉRENCES.....	96

4.2.3. Selection of dredging equipment	63
4.2.4. General considerations of reservoir dredging	65
4.2.5. Case studies	65
5. MEASURES TO COMPENSATE FOR RESERVOIR SEDIMENTATION	69
5.1. Dam raising	69
5.2. Construction of new dams	69
5.3. Design for sedimentation	69
5.4. Augmentation from adjacent catchments	71
6. RESERVOIR SEDIMENTATION MODELLING	73
6.1. Empirical relationships	73
6.2. Mathematical modelling	73
6.3. Physical modelling	77
7. THE DESIGN OF OUTLETS FOR SLUICING/FLUSHING OPERATIONS	79
7.1. General	79
7.2. Discharge capacity of bottom outlets	79
7.3. Layout of bottom outlets	81
7.4. Obstruction of the outlets	83
7.5. Abrasion	85
8. WATER RESOURCES PLANNING AND DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION CONTROL	87
8.1. Selection of dam location	87
8.2. Selection of sedimentation control techniques	87
9. RECOMMENDATIONS	95
10. REFERENCES	96

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURE

- Tableau 1 - Caractéristiques de retenues Chinoises soumises à des opérations de lâchure
- Tableau 2 - Nombres de Froude densimétriques pour la prévision de la formation de courants de densité
- Tableau 3 - Rapports du débit solide sortant au débit solide entrant, enregistrés lors de l'évacuation de courants de densité
- Tableau 4 - Courants de densité observés au Lac Mead
- Tableau 5 - Rapports eau/détritus enregistrés
- Tableau 6 - Recommandations concernant le mode d'exploitation d'une retenue pour la maîtrise de l'alluvionnement
- Tableau 7 - Modes d'exploitation et alluvionnement de la retenue Sanmexia, Chine
- Fig. 1. - Exploitation de retenues et maîtrise de l'alluvionnement (*Basson, 1996*)

LIST OF TABLES AND FIGURE

Table 1 - Chinese reservoir characteristics with sluicing operation

Table 2 - Typical densimetric Froude numbers for prediction of density current formation

Table 3 - Recorded ratios of outflow to inflow sediment load in density current venting

Table 4 - Observed density current in Lake Mead

Table 5 - Recorded W-D ratios

Table 6 - Guidelines for reservoir operation and sedimentation design

Table 7 - Reservoir operation and sedimentation at Sanmexia Reservoir, China

Fig. 1 - Reservoir operation and sedimentation control (*Basson, 1996*)

AVANT-PROPOS

Le présent Bulletin a été préparé par le Comité de l'Alluvionnement des Retenues créé à la 58^e Réunion Exécutive de la CIGB, à Sydney (Australie), en mai 1990.

Les missions du Comité étaient les suivantes :

- « Méthodes pour réduire le dépôt des sédiments entrant dans les retenues »;
- « Évaluation des effets à long terme, causés par le dépôt de sédiments dans les retenues, sur les rivières à l'aval »;
- « Estimation de l'impact économique de l'alluvionnement des retenues et solutions pour en réduire les effets ».

Actuellement, il y a environ 39 000 grands barrages en service à travers le monde. Ces barrages prenant de l'âge, un alluvionnement plus ou moins important de leurs retenues se produit, ce qui, dans le temps, peut poser de plus en plus de problèmes dans la réalisation des objectifs fixés à ces barrages. Il incombe donc aux maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage de ces aménagements d'apporter plus d'innovations et d'améliorations afin de prévenir et résoudre les problèmes relatifs à l'alluvionnement.

Le Bulletin répond à la première mission du Comité et à la préoccupation exprimée ci-dessus. Il présente les techniques actuelles destinées à réduire le dépôt initial de sédiments dans les retenues et les effets de ces dépôts une fois formés.

Je remercie les membres du Comité pour leur intéressantes contributions à la préparation de ce rapport, et spécialement MM. Albert Rooseboom et Gerrit Basson pour leur active participation à la rédaction du rapport jusqu'à sa version finale. Je remercie également le Secrétaire Général et son personnel pour la mise au point du rapport en vue de son impression.

R.I. Strand
Président du Comité de
l'Alluvionnement des Retenues

REMERCIEMENTS

Ce document a été rédigé par Prof. G.R. Basson et Prof. A. Rooseboom au nom du Comité National Sud-Africain des Grands Barrages.

Des commentaires ont été reçus de : S. Bruk (Unesco), C. Fouladi (Italie), T.C. Kabell (ZIMCOLD, Zimbabwe), J. Kroon (SANCOLD, Afrique du Sud), P. Marinescu (Comité Roumain des Grands Barrages), T. Miyaguchi (JANCOLD, Japon), T. Morimoto (Japon), R. Paolina (Italie), W. Pircher (Autriche), S.P. Sen (INCOLD, Inde), Y.N. Yoon (Corée), J. Zielinski (Pologne).

Qu'ils en soient tous vivement remerciés.

Une partie des informations contenues dans le Bulletin résulte des travaux de recherche soutenus par la *South African Water Research Commission*, à qui nous exprimons notre gratitude.

FOREWORD

This Bulletin was prepared by the Committee on Sedimentation of Reservoirs which was appointed at the 58th Executive Meeting in Sydney, Australia, in May 1990.

The Terms of Reference were as follows :

- “ Methods of minimizing deposition of incoming sediment in reservoirs ”;
- “ Assessment of long term impacts of reservoir sediment deposition on the downstream river ”;
- “ Evaluation of the economic impact of reservoir sedimentation and alternatives to mitigate those impacts ”.

Today there are approximately 39 000 large dams throughout the world. As each of these dams age, the reservoirs behind them accumulate sediment deposits to some degree. With that aging, these sediment deposits become more and more of a problem towards meeting the intended purposes of those dams. Therefore, it behooves the owners and engineers of these projects to become more innovative in preventing and resolving these sedimentation related problems.

This report addresses the Committee’s first Term of Reference and, hopefully, the concern expressed above. I believe that the information contained in this Bulletin is the “ state of the art ” in techniques for reducing initial reservoir sediment deposition and reducing or minimizing the effects of those deposits, once formed.

I am thanking the members of the Committee for their valuable contributions to this report and their patience with the Chairman. Particular appreciation is extended to Messrs. Albert Rooseboom and Gerrit Basson for their efforts in seeing this project to fruition. The Secretary General and his staff have been most diligent in finalizing this product.

R.I. Strand
Chairman, Committee on
Sedimentation of Reservoirs

ACKNOWLEDGEMENTS

This document has been written by Prof. G.R. Basson and Prof. A. Rooseboom on behalf of the South African Committee on Large Dams.

Comments which were received from the following persons are gratefully acknowledged : S. Bruk (Unesco), C. Fouladi (Italy), T.C. Kabell (ZIMCOLD, Zimbabwe), J. Kroon (SANCOLD, South Africa), P. Marinescu (Romanian Committee on Large Dams), T. Miyaguchi (JANCOLD, Japan), T. Morimoto (Japan), R. Paolina (Italy), W. Pircher (Austria), S.P. Sen (INCOLD, India), Y.N. Yoon (Korea), J. Zielinski (Poland).

Part of the work represented here was the outcome of research work which has been sponsored by the *South African Water Research Commission*, to whom we are indebted.

1. INTRODUCTION

Les retenues destinées au stockage d'eau pour l'irrigation, la production d'énergie, la maîtrise des crues, les loisirs, l'alimentation en eau potable, ou à buts multiples, sont devenues des éléments de première importance dans l'économie de nombreux pays dans le monde. L'hydroélectricité représente 21 % de la production mondiale d'électricité, les réservoirs augmentant les cultures de 17 % des terres irriguées dans le monde, intervenant ainsi pour un tiers de la production agricole mondiale (*Le Moigne et al.*, 1990 ; *Postel*, 1989).

La perte globale de capacité des retenues, due à l'alluvionnement, est estimée à 1 % par an, ce qui représente 6 milliards US \$ exprimés en coût de remplacement (*Mahmood*, 1987). Les apports solides ont été souvent sous-estimés dans le passé, ce qui a conduit à des problèmes d'alluvionnement dans les retenues bien avant la fin de leur durée de « vie économique » (*Smil*, 1987 ; *Goldsmith*, 1985 ; *Walling*, 1989 ; *Blanton et al.*, 1980). Dans de petits bassins versants de pays en développement, des augmentations d'apports solides de 4 à 5 % par an ont été observées par suite de peuplements inconsidérés, d'excès de pâturage, etc., et, dans ces conditions, la mise en valeur des ressources en eau doit être étudiée avec beaucoup de soin. Outre les pertes de capacité de retenue (qui sont examinées dans le présent document), le blocage des prises d'eau par des sédiments, les changements du régime de la rivière, l'augmentation des inondations, les effets sur les pêches, sur la qualité de l'eau (phosphore et autres polluants transportés par les sédiments), etc. sont quelques-uns des effets négatifs de l'alluvionnement.

Le souci d'assurer une viabilité à long terme et une utilisation durable des réservoirs a conduit, à travers le monde, à des efforts pour évaluer et développer des techniques permettant de gérer l'alluvionnement des retenues. En ce qui concerne le projet et l'exploitation des retenues, le principal objectif du contrôle de l'alluvionnement de celles-ci est de définir des techniques appropriées de maîtrise des sédiments en vue de minimiser les effets de l'alluvionnement de la retenue, en assurant ainsi une longue durée de vie du réservoir.

Il existe diverses solutions pour la maîtrise de l'alluvionnement des retenues :

- (i) minimiser les apports solides entrant dans les retenues au moyen :
 - de programmes de conservation du sol et de l'eau
 - de captage des sédiments à l'amont (barrages de rétention de détritiques, ou rideaux de végétation)
 - de dérivation des apports solides élevés
- (ii) réduire les dépôts solides dans la retenue au moyen :
 - de lâchures d'eau : en faisant traverser la retenue aux eaux de crue chargées de sédiments, par abaissement du niveau du réservoir
 - d'évacuation par courants de densité

1. INTRODUCTION

Water reservoirs, storage for irrigation, hydro power, flood control, recreation, potable use or combinations of these have become critical elements in the economy of many countries in the world. Hydro power accounts for 21 % of the world's electricity output, while storage reservoirs augment the cultivation of 17 % of the world's irrigated crop land, thus accounting for one third of the world's agricultural output (*Le Moigne et al, 1990; Postel, 1989*).

The estimate for global reservoir capacity loss due to sedimentation is 1% per annum, which converts to US\$ 6 billion when expressed in terms of replacement cost (Mahmood, 1987). Sediment yields have in the past often been underestimated which resulted in sediment problems being experienced in reservoirs long before their “ economic life ” had come to an end (*Smil, 1987; Goldsmith, 1985; Walling, 1989; Blanton et al, 1980*). In small catchments in the developing world sediment yield increases of 4 % to 5 % per annum have been experienced due to informal settlements, overgrazing, etc. and planning of water resources development should be carried out with great care under these conditions. Apart from storage losses (which will be addressed in this document), sedimentation of intakes, changing river regime, increased flooding, impacts on fisheries, water quality (phosphorus and other sediment-carried pollutants), etc. are some of the negative effects of sedimentation.

Concern for the long-term viability and sustainable use of reservoirs has led to worldwide efforts to evaluate and develop techniques to deal with reservoir sedimentation. The main objective of reservoir design and operation to control reservoir sedimentation is to define suitable sediment control techniques to minimize the impacts of reservoir sedimentation thus ensuring a long lifespan for a reservoir.

There are various options for reservoir sedimentation control:

- (i) minimize sediment loads entering reservoirs through
 - soil and water conservation programmes
 - upstream trapping of sediment (debris dams or vegetation screens)
 - bypassing of high sediment loads
- (ii) minimize deposition of sedimentation in a reservoir through
 - sluicing: passing of sediment-laden floodwaters through the reservoir by means of drawing the water level down
 - density current venting

- (iii) enlever les dépôts solides accumulés au moyen :
 - de chasses, en abaissant le niveau d'eau au cours des saisons pluvieuses
 - de dragages ou autres opérations mécaniques
- (iv) compenser l'alluvionnement de la retenue
 - en maintenant la capacité de stockage à long terme par surélévation du barrage
 - en abandonnant/mettant hors service la retenue comblée de sédiments et en construisant une nouvelle retenue, ou en introduisant de l'eau venant d'ailleurs.

La faisabilité technique, économique et environnementale des mesures précitées dépend d'un certain nombre de facteurs particuliers au site, tels que :

- disponibilité d'ouvrages de vidange de fond appropriés
- excédent d'eau disponible pour les chasses
- caractéristiques des sédiments et de la cuvette de la retenue
- but du stockage et de la demande en eau
- conséquences des opérations de chasse et de dragage des sédiments
- conséquences de l'interférence des mesures de maîtrise de l'alluvionnement avec l'exploitation de la retenue
- effets sur l'environnement
- limitations institutionnelles-politiques.

L'application des techniques sus-mentionnées est examinée dans le présent Bulletin. Bien qu'aucune description détaillée de la théorie ne soit fournie, ce document peut servir de guide pour l'étude et la mise en œuvre des mesures de maîtrise de l'alluvionnement des retenues. Les effets environnementaux de la maîtrise de l'alluvionnement des retenues ne rentrent pas dans le cadre de ce Bulletin. Les aspects de la détermination des apports solides ont été convenablement traités dans le Bulletin 67 (1989) et ne seront donc pas répétés dans le présent Bulletin.

- (iii) remove accumulated sediment deposits through
 - flushing by means of drawing the water level down during the rainy season
 - excavation by means of dredging or other mechanical equipment
- (iv) compensating for reservoir sedimentation
 - maintain long-term storage capacity by raising the dam
 - abandon/decommission the sedimented reservoir and construct a new reservoir or introduce water from elsewhere

The technical, economical and environmental feasibility of the above measures depends on a number of site specific factors such as :

- availability of suitable bottom outlet facilities
- surplus water available for flushing
- characteristics of the sediments and reservoir basin
- purpose of storage and water demand
- consequences of flushing/dredging sediment disposal
- consequences of control measures interfering with the reservoir operation

- environmental impact
- institutional-political limitations.

Implementation of the techniques listed above are reviewed in this Bulletin. Although no detailed description of theory is provided, this document can serve as guideline for the design and operation of reservoir sedimentation control measures. Environmental consequences of reservoir sedimentation control is beyond the scope of this Bulletin. Aspects of sediment yield determination have been adequately dealt with in ICOLD Bulletin 67 (1989) and are therefore not repeated in this Bulletin.

2. RÉDUCTION DES APPORTS SOLIDES GRÂCE À LA GESTION DU BASSIN VERSANT

2.1. GÉNÉRALITÉS

Des programmes de gestion des bassins versants, considérés comme le moyen le plus efficace de maîtriser l'alluvionnement des retenues en prévenant celui-ci, ont été mis en œuvre dans de nombreux pays depuis les années 1930; il s'agit de programmes de conservation du sol et de l'eau.

Les apports solides d'un bassin versant sont associés à l'érosion affectant ce bassin versant et peuvent être déterminés au moyen de prélèvements d'échantillons dans la rivière, sur une longue période et à fréquence élevée, ou à partir d'informations fournies par des levés topographiques réguliers de la cuvette de la retenue (*Bruck*, 1985). Des cartes d'apports solides ont été établies dans divers pays à partir de mesures directes et des modèles empiriques régionaux ont été mis au point (*Singh et al.*, 1990; *Bordas et al.*, 1988; *Rooseboom*, 1992, *Lu*, 1990; *Meijerink*, 1977). Ces cartes d'apports solides montrent que ceux-ci, rapportés à l'unité de bassin versant, sont souvent inversement proportionnels à la surface du bassin versant (*Wolman*, 1989; *Mahmood*, 1987).

Dans ce chapitre consacré à la gestion du bassin versant, les programmes de conservation du sol et de l'eau feront l'objet d'un examen général, tandis que la réduction des apports solides à la retenue, au moyen de rideaux de végétation, de dérivation des apports solides et de la construction de barrages de captage des sédiments en amont, sera traitée plus en détail.

2.2. CONSERVATION DU SOL ET DE L'EAU

Trois catégories principales de mesures de conservation du sol ont été définies (*Xu et Lu*, 1991) :

- **Végétation** comprenant : reboisement, plantation d'arbres, mise du sol en herbe, constitution de rideaux de végétation. Des mesures de contrôle biologique sont difficiles à exécuter, à surveiller, et les programmes de conservation du sol font donc appel à des mesures techniques (physiques) (*Xiong et al.*, 1989).

- **Mesures techniques** comprenant le contrôle des ravines, la construction de barrages de correction, la dérivation des eaux de crue vers des terres cultivables (fertilisation par colmatage), etc. Ces mesures jouent un rôle important dans les régions semi-arides où le ruissellement est insuffisant pour les mesures de contrôle se rapportant à la végétation.

- **Mesures de culture des terres** comprenant des pratiques agricoles telles que l'exploitation du sol suivant des lignes de niveau, le labourage profond, les plantations denses, etc.

L'érosion est souvent considérée comme un problème essentiellement associé aux activités humaines, en relation directe avec les apports solides. Les études de

2. REDUCTION OF SEDIMENT YIELDS THROUGH WATERSHED MANAGEMENT

2.1 GENERAL

Watershed management programmes, thought to be the most effective means of reservoir sedimentation control by preventing sedimentation, have been implemented in many countries since the 1930s through the implementation of soil and water conservation programmes.

The sediment yield of a catchment is related to erosion in the catchment and can be determined by long-term high frequency sampling in a river or using information of regular reservoir basin surveys (*Bruck, 1985*). National sediment yield maps have been produced based on direct measurement and regional empirical models have been developed (*Singh et al, 1990; Bordas et al, 1988; Rooseboom, 1992; Lu, 1990; Meijerink, 1977*). These yield maps show that sediment yields at the catchment level are often inversely proportional to catchment size (*Wolman, 1989; Mahmood, 1987*).

In this section on Watershed Management, soil and water conservation programmes will be discussed in general, while the reduction of sediment inflows to a reservoir by means of vegetation screens, diversion and bypassing of sediment, and the construction of upstream sediment trapping dams will be dealt with in more detail.

2.2 SOIL AND WATER CONSERVATION

Three main categories of soil conservation measures have been defined (*Xu and Lu, 1991*):

- **Vegetation practices** include afforestation, shrubs, grassing and vegetation screens. Biological control measures are difficult to measure, to enforce and to monitor and therefore most soil conservation programmes resort to engineering (physical) measures (*Xiong et al, 1989*).

- **Engineering measures** include gully control, check dams, diverting flood-water to warp farm land, etc. These measures play the principal role in semi-arid regions where run-off is insufficient for vegetation control measures.

- **Land tillage measures** include agricultural practices such as contour farming, deep ploughing, dense planting, etc.

Erosion is often believed to be essentially a man-made problem, directly linked to sediment yield. Long-term soil conservation studies have proven however that the

conservation du sol ont toutefois prouvé que la relation entre érosion et apports solides d'un bassin versant était très complexe en vérité. Si les programmes de conservation peuvent réduire les apports solides de 30 à 70 % dans les petits bassins versants, les apports solides dans les bassins versants de plus de 2 500 km² convergent vers une moyenne régionale dans les climats tempérés (*Wolman, 1989; Delft Hydraulics, 1992*).

Les programmes de conservation du sol et de l'eau destinés à réduire l'alluvionnement des retenues dans les zones semi-arides ne sont pas praticables. La grande variation des débits de pointe annuels peut conduire à 40 % des charges solides sur le long terme transportés par des crues survenant avec une fréquence inférieure à 10 ans (*Neff, 1970*). Dans les régions humides et semi-humides, 90 % des sédiments sont transportés par des crues de fréquence supérieure à 10 % (*Delft Hydraulics, 1992*). Dans les régions semi-arides, les programmes de conservation doivent donc être efficaces pour les conditions de ruissellement extrême (à des coûts relatifs élevés), tandis que dans les régions humides les travaux de conservation doivent être seulement étudiés pour des conditions de ruissellement moyen et être toujours efficaces.

Des phénomènes rares, tels que des cyclones, peuvent conduire à des transports solides massifs sur une courte période et à une perte de capacité de retenue (*White, 1990; Meade et Parker, 1985; Laronne, 1990*). Des augmentations d'apports solides à court terme peuvent aussi être attribuées à des déboisements (*Blackwelder, 1986; Aitken, 1981*) et à des pratiques agricoles (*Frenette et al., 1982*), et seront prises en compte dans les programmes de conservation du sol et de l'eau.

L'identification des sources principales de sédiments dans un bassin versant et leurs relations avec les apports solides peuvent réduire la zone nécessitant des mesures de conservation du sol et ainsi diminuer les dépenses (*Wolman et al., 1989*). En Chine, les sources principales de sédiments ont été identifiées : près de 50 % des transports solides du fleuve Yangtze proviennent d'une zone représentant 13 % de la surface totale du bassin versant; en ce qui concerne le Fleuve Jaune, 43 % des transports solides proviennent de 7 % seulement du bassin versant (*Hengyue et al., 1989*).

Les petits bassins versants (< 150 km²) tendent à engendrer des taux d'apports solides plus élevés que les grands bassins versants. Les conditions d'application de programmes de conservation efficaces dans un petit bassin versant sont cependant beaucoup plus favorables que dans les grands bassins versants, principalement pour des raisons économiques.

La maîtrise des sédiments à long terme nécessite un programme complet de gestion des terres (*Wolman et al., 1989*). Un tel programme doit être mis en œuvre en tenant compte des conditions naturelles et socio-économiques existant dans l'ensemble de l'environnement. Afin qu'un tel programme réussisse, l'implication de la population locale est nécessaire, et la gestion du bassin versant devra viser également à améliorer le niveau de vie de cette population (*Tan, 1994*).

Si des économies prospères (par exemple, les États-Unis) et des systèmes politiques forts (la Chine) ont supporté des programmes de conservation du sol à grande échelle, d'autres pays, principalement du Tiers-Monde, ont connu des problèmes d'organisation et de financement pour la gestion de bassins versants (*Dogra, 1985; Jordaan, 1989*).

Bien que des programmes de conservation du sol et de l'eau aient été entrepris avec de grands espoirs de maîtrise de l'alluvionnement des retenues, ils ne sont pas

relationship between erosion and sediment yield of a catchment is very complex indeed. Although conservation programmes can reduce sediment yield by between 30% and 70% in small catchments, the sediment yields in catchments over 2 500 km² converge to a regional average in temperate climates (*Wolman, 1989; Delft Hydraulics, 1992*).

Soil and water conservation programmes to reduce sedimentation of reservoirs in semi-arid areas are not practicable. High variability in annual peak flows could result in 40% of the long-term sediment load being transported by floods occurring with a frequency of less than 10 years (*Neff, 1970*). In humid and semi-humid regions 90% of the sediment is transported by floods with a frequency of more than 10 % (*Delft Hydraulics, 1992*). In semi-arid regions conservation programmes therefore have to be effective for extreme run-off conditions (at related high cost), while in humid regions conservation works need only be designed for mean run-off conditions and still be effective.

Rare events such as cyclones can cause massive short-term sediment transport and reservoir capacity loss (*White, 1990; Meade and Parker, 1985; Laronne, 1990*). Short-term sediment yield increases can also be contributed to deforestation (*Blackwelder, 1986; Aitken, 1981*) and agricultural practices (*Frenette et al, 1982*), and should be taken into account in soil and water conservation programmes.

Identification of major sediment sources in a catchment and their connective links with sediment yield may reduce the area requiring soil conservation and thus lower expenditure (*Wolman et al, 1989*). In China major sediment sources have been identified: Almost 50 % of the sediment load of the Yangtze River originates from an area comprising 13 % of the total catchment, while 43 % of the Yellow River's sediment load originates from only 7 % of the catchment (*Hengyue et al, 1989*).

Small catchments (< 150 km²) tend to be more susceptible to higher sediment yields than larger catchments. The opportunities for effective conservation programmes in a small catchment are however, much more favourable than for larger basins, mainly due to economical reasons.

Long-term sediment control demands a comprehensive land management programme (*Wolman et al, 1989*). Such a programme has to be implemented on the basis of the status of the natural and socio-economic conditions, considering the whole environment. In order for a programme to be successful the involvement at grassroots level of local people is a necessity and watershed management should therefore also aim at raising their living standard (*Tan, 1994*).

While strong economies such as the USA and strong political systems (China) have supported soil conservation programmes on a large scale, other mainly Third World countries have experienced problems organizing and funding watershed management (*Dogra, 1985; Jordaan, 1989*).

Although soil and water conservation programmes were started with great expectations to control reservoir sedimentation, they are not seen as the prime

considérés comme les mesures primordiales de lutte contre l'alluvionnement pour un certain nombre de raisons (*Delft Hydraulics*, 1992) :

- Les programmes de conservation du sol et de l'eau ne sont pas efficaces dans des conditions tectoniques instables et dans le cas de crues exceptionnelles.
- Ces programmes sont coûteux et difficiles à organiser.
- Les programmes de conservation ne produisent des effets sur la réduction des apports solides qu'à long terme, étant donné que le passage de la maîtrise de l'érosion à la réduction des apports solides est long et complexe (*Trimble*, 1983).
- Ces programmes peuvent causer des modifications de la nature du sol, une acidification des eaux de ruissellement, des modifications dans le ruissellement, avec des conséquences négatives (*Peart*, 1992).

Exemples

- Aux **États-Unis**, un programme de conservation du sol et de l'eau fut mis en œuvre dans les années 1940, avec une approche multi-dimensionnelle incluant des composantes institutionnelles, législatives, financières et technologiques, dans 3 000 Districts de Conservation des Sols. Bien que se rapportant à une petite échelle et concernant une courte période, des résultats satisfaisants ont été obtenus (*Delft Hydraulics*, 1992) :

- Au réservoir Newran, des barrages de broussailles ont conduit à une réduction de 72 % des apports solides sur 8 ans.
- Une réduction de 43 % des apports solides a été obtenue dans un bassin versant de 19 km² en Caroline du Nord.
- Une réduction de 33 % des apports solides a été obtenue pour le lac Waco, Texas (bassin versant de 4 300 km²).

Wolman et al. (1989) indique toutefois que les réductions à long terme des apports solides aux États-Unis, spécialement dans les grands bassins versants, sont nettement inférieures à celles estimées à l'origine. Contrairement à une perception du public, l'agriculture moderne aux États-Unis intervient seulement pour moins d'un quart de l'alluvionnement de l'ensemble des retenues (*Crowder*, 1987).

- En **Chine**, des mesures de conservation du sol ont été mises en œuvre, à grande échelle, depuis les années 1950, comprenant principalement des mesures techniques et des pratiques de culture des terres. Dans les années 1970, des réductions d'apports solides de 50 % furent avancées, bien que maintenant on pense qu'une réduction de l'ordre de 25 % résulte d'une faible pluviosité (*Xiong Guishu et al.*, 1989). Les données d'observations concernant le Fleuve Jaune, pour les périodes 1950 à 1969 et 1969 à 1984, indiquent des réductions d'apports solides de 34 %, du ruissellement de 30 %, les pluies ayant diminué seulement de 11 % (*Xu et Lu*, 1991).

- Au **Pakistan**, un vaste programme de conservation du sol, entrepris en 1960 pour le bassin versant de 33 333 km² du barrage Mangla, n'a pas eu d'effets, jusqu'en 1983, sur les apports solides (*Mahmood*, 1987).

Brak (1985) examine les programmes de conservation du sol et de l'eau concernant les retenues Tungabhadra et Guanting.

defence measures against sedimentation due to a number of reasons (*Delft Hydraulics*, 1992):

- Soil and water conservation programmes are not effective under tectonically unstable conditions and extreme flood events.
- These programmes are expensive and difficult to organize.
- Conservation programmes only yield effects on sediment yield reductions in the long-term as the translation from erosion control to sediment yield reduction is slow and complex (*Trimble*, 1983).
- These programmes can lead to changes in soil nature, acidification of run-off, and changes in run-off, with negative consequences (*Peart*, 1992).

Case studies

– In the **USA** a soil and water conservation programme was implemented in the 1940s with a multi-dimensional approach incorporating institutional, legislative, financial and technological components in 3 000 Soil Conservation Districts. Successes, though on a small scale and over a short period, were achieved (*Delft Hydraulics*, 1992) :

- At Newran Reservoir, brush dams led to a 72% reduction in sediment yield over 8 years.
- A 43% sediment yield reduction was achieved in a 19 km² catchment in North Carolina.
- A 33% sediment yield reduction was achieved for Lake Waco, Texas, with a catchment of 4 300 km².

Wolman et al (1989) indicates however that the long-term reductions in sediment yield in the USA especially over large catchments, are much less than originally estimated. Contrary to popular perception, modern agriculture in the USA only accounts for less than a quarter of total reservoir sedimentation (*Crowder*, 1987).

– In **China** soil conservation has been carried out on a large scale since the 1950s, mainly involving engineering measures and land tillage practices. In the 1970s sediment yield reductions of 50 % were claimed, although it is now believed that up to 25 % of the reduction could have been due to reduced rainfall (*Xiong Guishu et al.*, 1989). Field data for the Yellow River for the periods 1950 to 1969 and 1969 to 1984 indicate reductions in sediment yield of 34 %, run-off of 30 % while the rainfall decreased only 11 % (*Xu and Lu*, 1991).

– In **Pakistan** a comprehensive soil conservation programme, started in 1960 for the Mangla Dam catchment of 33 333 km², had until 1983 had no impact on sediment yields (*Mahmood*, 1987).

Bruk (1985) discusses the soil and water conservation programmes at Tungabhadra and Guanting Reservoirs.

2.3. DÉRIVATION DES EAUX CHARGÉES DE SÉDIMENTS POUR L'AGRICULTURE

La dérivation des eaux chargées de sédiments à l'amont des réservoirs pour la fertilisation (procédé connu sous le nom de « colmatage ») et l'irrigation des terres est pratiquée sur une grande échelle en Chine où les crues transportent de fortes concentrations de sédiments très fins riches en éléments nutritifs pour les terres de culture; de nouvelles terres de culture fertiles sont ainsi créées tout en réduisant l'alluvionnement des retenues. Il y a 2 000 ans déjà, les Chinois creusaient des canaux de dérivation des eaux chargées de sédiments pour irriguer les terres de culture (*Zhang Hao et al.*, 1976). La quantité de sédiments dérivés pour la fertilisation des terres dans la Province Shanxi, Chine, est estimée à plus de 40 millions de tonnes par an, ce qui réduit fortement les taux d'alluvionnement des retenues aval (*Xu et Lu*, 1991).

À la retenue Tourjisan, Chine, la dérivation des eaux de crue pour la fertilisation des terres a prolongé la durée de vie estimée de la retenue et, après 9 années d'exploitation, l'alluvionnement de celle-ci a été faible, tandis que 4 000 ha de terres de culture ont été mis en valeur.

2.4. BARRAGES DE CAPTAGE DES SÉDIMENTS À L'AMONT

Les programmes de conservation du sol et de l'eau comprennent souvent la construction de barrages de captage de sédiments dans les bassins versants pour réduire l'érosion par ravinement. Les observations in situ montrent cependant qu'ils ont rarement un effet important sur les apports solides (*Mahmood*, 1987). Les barrages de petites dimensions captent seulement les particules grossières des sédiments et la charge solide atteint de nouveau rapidement, à l'aval d'un barrage de captage, la capacité de transport solide de la rivière.

Les sédiments captés peuvent être enlevés par des engins de terrassement afin de récupérer un volume de stockage. Des rideaux de végétation se sont révélés inefficaces dans les zones où les pentes sont raides.

Un inconvénient des barrages de captage, spécialement dans les zones arides, est d'augmenter l'évaporation et de réduire le ruissellement. Si la crête de l'évacuateur de crue du barrage de captage est trop haute, un delta se crée au-dessus du fond de vallée existant, ce qui peut conduire à la formation de nouvelles ravines de chaque côté du delta. *Rooseboom* (1985) recommande donc de placer la crête des évacuateurs à un niveau suffisamment bas pour que les crues de probabilité 20 ans n'inondent pas les bords des ravines.

2.5. RIDEAUX DE VÉGÉTATION

Des rideaux de végétation sont considérés comme l'un des moyens les plus efficaces pour réduire les apports solides dans une retenue (*Bruck*, 1985; *Brabben*, 1988). Un rideau de végétation est constitué par la croissance d'une végétation dense dans la rivière à l'amont d'une retenue, les apports solides étant retenus par suite de la diminution des vitesses d'écoulement. Les avantages et inconvénients de ces mesures de maîtrise des sédiments sont les suivants :

- Peu coûteux.
- Le remblaiement à l'amont peut conduire à l'alcalinisation des terres de culture, à des inondations, à des problèmes de navigation, etc.

2.3. DIVERSION OF SEDIMENT-LADEN FLOW FOR AGRICULTURE

The diversion of sediment-laden flows upstream of reservoirs for warping and irrigation is practised on a large scale in China where floods transport high concentrations of very fine sediment rich in nutrients for crops, thereby creating new fertile farm land and at the same time reducing reservoir sedimentation. As early as 2 000 years ago, the Chinese were known to have cut canals to divert the sediment-laden water for irrigation of farm lands (*Zhang Hao et al.*, 1976). The volume of sediment diverted for warping in the Shanxi Province, China, is estimated at over 40 million tons per year, with greatly reduced downstream reservoir sedimentation rates (*Xu and Lu*, 1991).

At the Tourjisan Reservoir, China, diversion and warping of flood-water has extended the estimated lifespan of the reservoir and after 9 years of operation, little sedimentation has occurred, while 4 000 ha of farmland has been reclaimed.

2.4. UPSTREAM SEDIMENT TRAPPING (DEBRIS OR CHECK) DAMS

Sediment trapping dams are often constructed in a catchment as part of the soil and water conservation programme to limit gully erosion. Field data show, however, that they seldom have a major impact on the sediment yield (*Mahmood*, 1987). The small size dams trap only the coarser sediment particles and the sediment load quickly builds up downstream of a debris dam to the sediment transport capacity of the river again.

Trapped sediments can be removed by means of earthmoving machines in order to recover storage space. Vegetation screens have been found to be ineffective where slopes are steep.

A disadvantage of debris dams, especially in arid areas, is increased evaporation and related reduced run-off. If spillway crests of silt dams are constructed too high, delta build-up will occur above the existing valley floor which could lead to the formation of new gullies on either side of the delta which outflank the dams. *Rooseboom* (1985) therefore recommends sufficient spillway capacity for a 1-in-20-year flood not to overflow the gully banks.

2.5. VEGETATION SCREENS

Vegetation screens are regarded as one of the most efficient ways to reduce sediment inflow to a reservoir (*Bruk*, 1985; *Brabben*, 1988). A vegetation screen consists of dense vegetation growth in the river upstream of a reservoir, which traps incoming sediment by slowing flow velocities. General advantages and disadvantages of these sediment control measures are the following :

- Inexpensive
- Aggradation upstream could lead to alkalization of farmlands, flooding, navigation problems, etc.

– L'évapotranspiration augmente les pertes d'eau (une augmentation des pertes d'eau de plus de 123 millions de m³ par an a été notée par *Maddock* (1948), ce qui représente 10 % de la fourniture d'eau annuelle de la retenue Elephant Butte) (*Garde et al.*, 1978).

– Des plantes exotiques peuvent envahir les terres environnantes.

– Dans des régions semi-arides, la croissance du rideau de végétation peut être limitée par un faible ruissellement sur de longues périodes, tandis que des crues peuvent emporter des parties du rideau.

Exemples

– À la **retenue Hongshan** (capacité de 2,5 x 10⁹ m³), en Chine, un rideau de végétation de 4 km de largeur et de 15 km de longueur capte 90 % des apports solides (*Zhao*, 1980).

– Aux **États-Unis**, l'alluvionnement de la retenue **Elephant Butte** et du **Lac McMillan** a été fortement réduit par le développement du tamaris (*Bruck*, 1985). *Lara* (1960) a signalé une réduction à un tiers du taux d'alluvionnement initial, à la retenue Elephant Butte, par un alluvionnement au-dessus du niveau normal de retenue. Cependant, dans le cas d'Elephant Butte l'efficacité était telle qu'il y avait un déficit d'entrée d'eau dans la retenue.

2.6. DÉRIVATION DES SÉDIMENTS

La dérivation des sédiments comporte le stockage d'eau non chargée de sédiments (faibles débits, en général), tandis que les charges solides élevées sont dérivées autour de la retenue. La dérivation peut être réalisée au moyen d'un canal/galerie avec la retenue sur la rivière, ou en ayant un réservoir de stockage en dehors du lit, alimenté par gravité depuis la rivière principale ou par pompage. Pour que le système de dérivation soit efficace à long terme, il doit être correctement dimensionné (avec un coût correspondant élevé) et exploité. Des systèmes de dérivation de sédiments sur toute la longueur d'une retenue ne peuvent être économiques que dans des conditions très spéciales. La topographie autour d'une retenue est rarement favorable à la réalisation d'une dérivation, mais un certain nombre de petits réservoirs ont été construits avec des ouvrages de dérivation.

Dans des zones arides, la dérivation des eaux chargées de sédiments peut être incompatible avec les besoins en eau, et l'exploitation à long terme doit être examinée avec soin. Des pièges à sédiments (pièges à sable) peuvent être utilisés dans de telles circonstances pour dessabler les eaux de crue; la phase de descente de l'hydrogramme de crue, qui généralement présente des concentrations de sédiments plus faibles que la phase de montée, peut être utilisée pour le stockage. Les pièges à sédiments sont moins efficaces pour l'enlèvement des silts et des argiles, mais la moitié de la charge en sable peut être enlevée avec un dixième du débit (*Mahmood*, 1987; *FAO*, 1975).

Exemples

– Au **barrage Nagle** (Afrique du Sud), la retenue principale (capacité de 21 millions de m³) est située sur une courbe de la rivière, en forme de fer à cheval, un petit seuil de dérivation des crues ayant été construit à l'amont pour dériver les

- Evapotranspiration increases water losses. (Increased losses of over 123 million m³/a were noted by *Maddock* (1948), which represents 10 % of the annual water supply of the Elephant Butte Reservoir) (*Garde et al.*, 1978).
- Exotic plant species could invade surrounding land.
- In semi-arid regions vegetation screen growth could be limited by low run-off for long periods, while floods could wash away parts of the screen.

Case studies

- At **Hongshan Reservoir** (storage capacity 2.5 x 10⁹ m³), China, a vegetation screen 4 km wide by 15 km long traps 90 % of incoming sediment (*Zhao*, 1980).
- In the **USA** at **Elephant Butte Reservoir and Lake McMillan**, reservoir sedimentation has been significantly reduced by the spread of the Tamarisk tree (*Brink*, 1985). *Lara* (1960) indicated a reduction to one third of the original sedimentation rate at Elephant Butte Reservoir by sedimentation above the full supply level. However, in the case of Elephant Butte build-up was so extensive that water was prevented from entering the reservoir.

2.6. BYPASSING OF SEDIMENT

Bypassing of sediment involves the storing of sediment-free water (usually low flows), while high sediment loads are bypassed around the reservoir. The bypassing system could consist of a channel/tunnel with the reservoir on the river, or by having a so-called off-channel storage reservoir fed under gravity from the main river or by pumped flow. For a bypassing system to be effective in the long-term, it must be correctly sized (with related high cost) and operated. Systems for bypassing sediments along the full length of a reservoir can only be economical under very special conditions. The topography around a reservoir seldom lends itself to making bypassing feasible but there are a number of smaller reservoirs which have been constructed with bypasses.

In arid areas, bypassing of sediment-laden water could be in conflict with the need for water, and the long-term operation must be carefully planned. Sediment excluders (sand traps) can be used in such circumstances to desilt flood-water, and/or the falling stage of the flood hydrograph which normally has lower sediment concentrations than the rising stage, could be utilized for storage. Sediment excluders are less effective in removing silt and clay, but half of the sand load can be removed with one tenth of the flow (*Mahmood*, 1987; *FAO*, 1975).

Case studies

- At **Nagle Dam**, South Africa, the main reservoir (storage capacity 21 million m³) is situated on a horseshoe bend in the river, while a small flood diversion weir was constructed upstream to bypass turbid water (*Annandale*, 1987).

eaux chargées (*Annandale, 1987*). Le canal de dérivation a été creusé dans la roche et a une pente raide. Au cours des années 1980, des débits atteignant 2 000 m³/s furent dérivés et aucun alluvionnement important n'a affecté la retenue depuis 1950.

– Les deux petites retenues créées par les **barrages Shongweni et Henley** (Afrique du Sud) ont des dérivations constituées par des galeries et des canaux revêtus de béton. Bien que les dérivations aient bien fonctionné pendant des décennies, des crues exceptionnelles (dus à des cyclones) dépassant les capacités de dérivation ont provoqué des réductions relativement importantes de volume de stockage. Au barrage Shongweni, une crue causée par un cyclone au cours de l'année 1987 a rendu le système de dérivation inaccessible et inexploitable.

– À la **retenue Gmünd** (Autriche), les sédiments sont dérivés à travers une galerie (*Rienossl et Schnelle, 1982*). L'abrasion de la galerie par les sables a entraîné des coûts élevés d'entretien.

– À la **retenue Tedzen** (Turkménistan), un canal de dérivation de crue a été construit le long d'une rive de la retenue. En moyenne, 28 % des eaux de crue ont été dérivés, ce qui a conduit à une réduction moyenne annuelle d'alluvionnement de 2,3 millions de m³ (*Hachaturian et al., 1966*).

– En Suisse, plusieurs retenues, telles que **Amsteg** (*Reed, 1931*) et **Palagnedra** (*Comité Suisse des Grands Barrages, 1982*), sont équipées de galeries de dérivation. La galerie de dérivation de Palagnedra a une longueur de 1 760 m, une section de 30 m² et une pente de 2 %. Sa capacité d'écoulement libre est de 225 m³/s.

– En Chine, les retenues **Shiya, Yanshuigon et Lushuihe** ont connu un faible alluvionnement sur un grand nombre d'années d'exploitation en raison de la présence de canaux ou de galeries de dérivation (*Xu et Lu, 1991; Zhang et al., 1983*).

Trois petites retenues italiennes sont équipées de galeries de dérivation : longueurs de 240 à 810 m, sections de 3 à 20 m², pentes de 4 à 18 %, capacités d'écoulement libre de 65 à 300 m³/s (*Delft Hydraulics*).

Bruk (1985) examine les ouvrages de dérivation des retenues Hushan et Amsteg.

2.7. RETENUE DE STOCKAGE EN DEHORS DU LIT DE LA RIVIÈRE

Lorsque la retenue de stockage est située en dehors du lit de la rivière, la teneur moyenne en sédiments de l'eau prélevée tend à être beaucoup plus faible que la teneur moyenne correspondant aux débits de la rivière. Cela est dû au fait que les concentrations très élevées de sédiments dans les débits de la rivière correspondent aux forts débits et les périodes de concentration élevée tendent à être de courte durée dans les rivières transportant principalement des éléments fins en suspension.

Le stockage en dehors du lit de la rivière constitue donc une solution intéressante pour réduire l'alluvionnement d'une retenue, en particulier lorsque l'eau prélevée nécessite d'être remontée à des niveaux supérieurs par pompage ou lorsque les débits dérivés peuvent s'écouler par gravité jusqu'à la retenue de stockage située en dehors du lit.

The bypass channel was cut into rock and has a steep gradient. During the 1980's discharges up to 2 000 m³/s were bypassed and no significant sedimentation has occurred in the reservoir since 1950.

– Two small reservoirs, **Shongweni and Henley Dams**, South Africa, have bypasses consisting of tunnels and concrete-lined canals. Although the bypasses had functioned well for decades, extreme floods (caused by a cyclone) which exceeded the bypass capacities caused relatively large storage volume reductions. At Shongweni Dam a flood caused by a cyclone during 1987 created conditions which made the bypass system inaccessible and impossible to operate.

– At **Gmünd Reservoir**, Austria, the sediment is bypassed through a tunnel (*Rienossl and Schnelle*, 1982). High maintenance costs have been incurred due to abrasion of the tunnel caused by sand.

– At **Tedzen Reservoir**, Turkmenistan, a flood diversion canal was constructed along the side of the reservoir. On average 28 % of flood waters was bypassed, resulting in an annual average reduction of sedimentation of 2.3 million m³ (*Hachaturian et al.*, 1966).

– In Switzerland several reservoirs such as **Amsteg** (*Reed*, 1931) and **Palagnedra** (SNCOLD, 1982) have bypass tunnels. The diversion tunnel at Palagnedra is 1 760 m in length with a cross-sectional area of 30 m² and a slope of 2 %. The freeflow capacity is 225 m³/s.

– In China the **Shiya, Yanshuigon and Lushuihe** Reservoirs have had little sedimentation over many years of operation because of bypass channels or tunnels (*Xu and Lu*, 1991; *Zhang et al.*, 1983).

Three small Italian reservoirs have bypass tunnels (*Delft Hydraulics*). Their lengths range from 240-810 m; cross-sectional areas 3 to 20 m²; slopes 4 to 18% and free flow capacities 65 to 300 m³/s.

Brak (1985) discusses bypass facilities at the Hushan and Amsteg Reservoirs.

2.7. OFF-STREAM STORAGE

With off-stream storage, the average sediment concentration of the extracted water tends to be substantially lower than the average for the river flows. This is due to the fact that very high sediment concentrations in the river flows go with high discharges and the high concentration periods tend to be of short duration in rivers which carry mainly fine sediments in suspension.

Off-stream storage therefore forms an attractive option for limiting reservoir sedimentation especially where the extracted water needs to be pumped to higher elevations or in cases where diverted flows can gravitate to off-stream storage.

3. TRAVERSÉE DES RETENUES PAR LES APPORTS SOLIDES

Les sédiments sont généralement transportés, à travers les retenues, en suspension par turbulence et en suspension colloïdale, et un tel transport est amélioré par des opérations de lâchure; les courants de densité ne se produisent que dans des conditions spéciales. En général, le principal mode de transport des sédiments à travers une retenue est la suspension par turbulence.

3.1. LÂCHURES

3.1.1. Généralités

Les lâchures consistent à évacuer, à travers un barrage, les apports chargés de sédiments avant que ceux-ci puissent se déposer dans la retenue, le taux de captage de cette retenue étant ainsi réduit. Cela est réalisé le plus souvent en exploitant la retenue à cote basse pendant les saisons de crues, en vue d'obtenir une capacité suffisante de transport solide (suspension par turbulence et suspension colloïdale) à travers la retenue. Après la période de crue, le niveau de retenue est remonté pour stocker de l'eau relativement claire.

Les teneurs en sédiments sont susceptibles de beaucoup varier au cours d'une période de crue, étant donné que le ruissellement initial, principalement après une saison sèche, rencontre plus de matériaux transportables que les ruissellements ultérieurs. Les concentrations de sédiments tendent également à être plus fortes lors de la période de montée d'une crue que lors de la période de décroissance. Lors d'une opération de lâchure, il est donc recommandé de commencer le remplissage aussi tard que possible de façon à capter seulement de l'eau contenant peu de sédiments.

S'il est possible d'évacuer par érosion (par chasse) des sédiments dépourvus de cohésion longtemps après leur dépôt dans une retenue, ce n'est pas le cas pour des sédiments très cohérents. Une fois terminée la consolidation des sédiments cohérents, il est pratiquement impossible d'évacuer par érosion des quantités importantes de tels sédiments (*Basson et Rooseboom, 1997*). Le plus souvent, les dépôts de sédiments sur les rives ne peuvent être enlevés par des opérations de chasse et il importe donc que les dépôts de sédiments soient limités par des opérations de lâchure. Les vitesses nécessaires pour maintenir les sédiments en suspension sont généralement très inférieures à celles requises pour éroder des sédiments déposés, spécialement des sédiments cohérents (*Hu, 1990; Basson et Rooseboom, 1997*). Cela signifie que les lâchures de sédiments sont souvent plus efficaces que les opérations d'érosion par chasse.

Les lâchures des premières crues au cours des périodes pluvieuses sont importantes car ces crues transportent généralement des charges solides élevées.

3. PASSING INCOMING SEDIMENTS THROUGH RESERVOIRS

Sediment is generally carried through reservoirs in turbulent and colloidal suspension and such transport can be enhanced by sluicing operation, while density currents are only generated under special conditions. Generally however the most important transport mode available in passing sediments through a reservoir is that of turbulent suspension.

3.1. SLUICING

3.1.1. General

Sluicing is an operational technique in which sediment-laden inflows are released through a dam before the sediment particles can settle, thereby reducing the trap efficiency of the reservoir. This is accomplished in most cases by operating the reservoir at a lower water level during the flood season in order to facilitate sufficient sediment transport capacity (turbulent and colloidal) through the reservoir. After the flood season the pool level is raised to store relatively clear water.

Sediment concentrations carried by inflows tend to vary greatly during a single flood event, because the initial run-off, especially after a dry season, encounters more transportable material than subsequent run-offs. The sediment concentrations therefore also tend to be much higher during the rising stages of a flood than during the corresponding falling stages. In sluicing operation it is therefore wise to start impoundment as late as possible so as to trap only water which contains relatively little sediment.

While it is possible to scour (by flushing) non-cohesive sediments from reservoirs long after deposition has occurred, this is not the case with highly cohesive sediment. Once consolidation of cohesive sediment has taken place, it becomes practically impossible to scour significant quantities of such sediment from reservoirs (*Basson and Rooseboom, 1997*). Overbank deposition, in most cases, cannot be removed by flushing operation and it is therefore imperative that deposition of sediment is limited by sluicing operation. Velocities required to keep sediment in suspension are normally much lower than those required to erode deposited sediment, especially cohesive sediment (*Hu, 1990; Basson and Rooseboom, 1997*). This means that sluicing of sediments is often more efficient than scouring by flushing operation.

Sluicing of the first floods of the rainy season is important as they usually convey high sediment loads.

De nombreuses retenues sont exploitées afin que les apports solides les traversent, les réussites variant d'une retenue à l'autre (*Ackers et Thompson, 1987; Brabben, 1988; Brown, 1943; Bruk, 1985; Mahmood, 1987; Pitt et Thompson, 1984; Scheuerlein, 1987; Sloff, 1991; Zhang et Qian, 1987; Delft Hydraulics, 1992*).

3.1.2. Conditions aux limites

La réussite des opérations de lâchure dépend des facteurs suivants :

- Un volume d'eau excédentaire suffisant doit être disponible pour l'évacuation des sédiments.
- Les ouvrages d'évacuation doivent avoir une capacité suffisante et être de préférence situés près du lit originel de la rivière. Dans le cas de prises d'eau d'usines hydroélectriques, il importe de concevoir les ouvrages d'évacuation pour des lâchures conjointement avec les prises d'eau, afin de limiter les dépôts de sédiments aux prises.
- Une exploitation judicieuse de la retenue (époque, durée), par du personnel ayant une bonne formation, est indispensable et est souvent la partie la plus critique des opérations d'évacuation des sédiments.
- La cuvette de la retenue doit présenter une configuration étroite d'une extrémité à l'autre.
- La rivière doit essentiellement transporter des sédiments en suspension.
- Les débits de la rivière possèdent une surcapacité de transport de sédiments à travers la retenue.
- La prévision de l'hydrogramme des débits au site du barrage doit être fiable. Cela est important pour l'exploitation afin de remplir la retenue au bon moment après les opérations de lâchure.

3.1.3. Conception des opérations de lâchure

L'idéal serait de pouvoir faire passer les crues même les plus fortes à travers une retenue sans réduction des vitesses, mais cela est pratiquement ou économiquement impossible dans la plupart des cas, en raison des très grandes dimensions des ouvrages d'évacuation nécessaires et de la perte économique de capacité de retenue. À titre de compromis, *Rooseboom (1985)* a proposé comme critère que les débits entrants inférieurs ou égaux aux crues quinquennales devraient pouvoir traverser la retenue sans déposer une quantité importante de sédiments, tandis que les crues plus fortes déposeraient des sédiments mais ces dépôts seraient chassés pendant la période de crue avant que la consolidation ne se produise. (Des ouvrages d'évacuation qui ont été conçus en conséquence ont parfaitement fonctionné pendant quelque 20 ans sur la rivière Mtata, Afrique du Sud). Ce sera seulement le cas pour les retenues étroites. Dans les retenues de grande largeur, les sédiments se déposeront le long des rives au cours des crues et très peu seront érodés au cours des crues ultérieures. Dans de telles retenues, la capacité de stockage présentant un équilibre à long terme sera essentiellement constituée du lit mineur d'écoulement.

Numerous reservoirs are operated to pass sediments through with varying degrees of success as described by *Ackers and Thompson (1987)*, *Brabben (1988)*, *Brown (1943)*, *Brak (1985)*, *Mahmood (1987)*, *Pitt and Thompson (1984)*, *Scheuerlein (1987)*, *Sloff (1991)*, *Zhang and Qian (1985)*, and *Delft Hydraulics (1992)*.

3.1.2. Boundary conditions

Successful sluicing operations depend on the following:

- Enough surplus inflow must be available for discharging sediment.
- Outlet works must possess adequate capacity and preferably be located near the original river-bed level. In the case of hydropower intakes, it is important to design outlets for sluicing in conjunction with the intakes to limit sedimentation at the intakes.
- Judicious operation (time, duration) by properly trained operators is essential and is often the most critical part of sediment discharge operations.
- The reservoir basin should have a narrow configuration throughout.
- The river should transport mainly suspended sediments.
- The river flows possess excess capacity to transport sediment through the reservoir.
- The flow hydrograph must be predictable with confidence at the dam site. This is important for operation in order to fill the reservoir in time after the sluicing operation.

3.1.3. Sluicing operation design procedure

Ideally it would be preferable to pass even the biggest floods through a reservoir without reduction in velocity, but this is seldom practical or economical in most cases due to excessively large outlet structures required and loss of reservoir benefit. As a compromise, *Rooseboom (1985)* proposed that inflows up to the 1-in-5-year flood discharge should be allowed to pass through without depositing significant quantities of sediment, while larger inflows would tend to deposit sediments but these deposits should be flushed out during the flood period before consolidation takes place. (Reservoir outlets which have been designed accordingly have been functioning successfully for some 20 years on the Mtata River, South Africa). This will only be the case in narrow basin configurations. In wide reservoirs sediment will be deposited overbank during high flows and very little of it will be scoured during subsequent floods. In such reservoirs the long-term equilibrium storage capacity will mainly consist of the sluiced main channel.

Une fois la crue de projet fixée, les conditions de transport critiques à l'intérieur de la retenue doivent être définies. Étant donné que la capacité de transport de sédiments diminue dans la zone de remous d'une retenue, le transport de sédiments ne relève plus de la disponibilité en sédiments mais plutôt de la capacité de transport de sédiments. Dans de telles conditions, une relation particulière a été établie entre la puissance du courant et la teneur en sédiments (Rooseboom, 1975). Le niveau maximal de retenue pour une opération de lâchure est obtenu en calculant les capacités de transport des sédiments sur les profils en travers les plus critiques de la retenue pour différentes cotes de retenue au barrage. Quand on connaît le débit de la crue de projet et la hauteur d'eau au barrage, il est possible de concevoir des ouvrages d'évacuation de capacité suffisante. Des détails de conception concernant des évacuateurs de fond pour des opérations de lâchure et de chasse de sédiments sont donnés dans le chapitre 7. L'attention est attirée sur le fait que seules les formules ayant été étalonnées dans des conditions comparables seront utilisées pour les calculs de transport de sédiments.

Les lâchures comme mode d'exploitation de retenue ont été mises en œuvre pour maîtriser les problèmes d'alluvionnement de la retenue Sanmenxia sur le Fleuve Jaune en Chine, dans les années 1960 (Zhang, Q et Long, Y, 1980); elles ont été également adoptées avec succès, pendant des décennies, dans quelques retenues telles que le Vieux Barrage d'Assouan (Égypte), Roseires (Soudan), Bhatgarh (Inde), Matatila (Inde) et autres.

3.1.4. Exemples

– Le **Vieux Barrage d'Assouan** sur le Nil (Égypte) a été mis en service en 1902 et a été surélevé deux fois, en 1912 et 1933 (Mahmood, 1987). La capacité de la retenue est de $5,6 \times 10^9$ m³, le volume moyen annuel d'écoulement d'eau étant estimé à 84×10^9 m³. Le barrage est équipé de 180 vannes d'évacuation, d'une section totale d'ouverture de 2 240 m² et d'une capacité totale d'évacuation de 6 000 m³/s, les vannes restant ouvertes au cours des mois de crue de juillet, août et septembre. De l'eau « claire » est stockée au cours du reste de l'année pour l'hydroélectricité et l'irrigation. Des mesures topographiques ont indiqué que la capacité de retenue n'avait pas été affectée de manière significative par l'alluvionnement.

– Le **barrage Roseires** sur le Nil Bleu (Soudan) a été mis en service en 1966. Sa capacité de retenue est de 3×10^9 m³, le volume moyen annuel d'apport d'eau étant de 50×10^9 m³. La retenue est maintenue au niveau minimal du 15 juin à septembre, correspondant à la période de crue, pour évacuer la plus grande partie des apports solides élevés à travers 5 vannes de fond, chacune ayant 6 m de largeur et 10,5 m de hauteur, situées au niveau initial du lit. Le remplissage de la retenue a lieu généralement à la fin de la saison des crues.

Les opérations de lâchure au barrage Roseires ont conduit à un taux de captage de 46 à 57 %, très inférieur à la valeur de 83 % estimée pour des opérations de stockage (Mahmood, 1987).

L'efficacité des lâchures est plus faible comparativement au Vieux Barrage d'Assouan, principalement à cause de la plus grande largeur (13,5 km) de la retenue

Once a decision has been made on the design flood to be catered for, the critical transporting conditions within the reservoir have to be established. As the sediment carrying capacity decreases within the backwater zone of a reservoir, availability of sediment no longer controls the sediment transport, but rather the sediment transport capacity. Under such conditions a singular relationship has been found between stream power and sediment concentration (*Rooseboom, 1975*). The maximum pool level for sluicing operation is obtained by calculating sediment transporting capacities at the most critical reservoir cross-sections for different pool levels at the dam. With the design discharge and stage at the dam known, it is possible to design controlled outlets with sufficient discharge capacity. Design details regarding bottom outlets for sluicing/flushing are given in Chapter 7. It is stressed that only formulae which have been calibrated under comparable conditions should be used for sediment transport calculations.

Sluicing as a mode of reservoir operation was developed for controlling the sedimentation problems of Sanmenxia Reservoir on the Yellow River, China, in the 1960s (*Zhang, Q and Long, Y, 1980*), but it has also been practised successfully for decades in some reservoirs such as the Old Aswan (Egypt), Roseires (Sudan), Bhatgarh (India), Matatila (India) and others.

3.1.4. Case studies

– The **Old Aswan Dam** on the Nile River, Egypt, was commissioned in 1902, and raised twice, in 1912 and 1933 (*Mahmood, 1987*). The storage capacity of the reservoir is $5.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ while the mean annual run-off is estimated at $84 \times 10^9 \text{ m}^3$. The dam has 180 sluice gates with a total cross-sectional area of $2\,240 \text{ m}^2$ a flood discharge capacity of $6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ and the sluice gates are kept open during the flood months of July, August and September. “ Clear ” water is stored during the remainder of the year for hydro power and irrigation. Surveys have indicated that the reservoir capacity has not been significantly affected by sedimentation.

– The **Roseires Dam** on the Blue Nile, Sudan, was constructed in 1966. It has a storage capacity of $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ while the mean annual inflow is $50 \times 10^9 \text{ m}^3$. The reservoir is kept at a minimum pool level from June 15 to September, the flood period, to discharge most of the high sediment inflows through 5 deep sluice gates, 6 m wide by 10.5 m high each, placed at the original bed level. Filling the reservoir usually takes place late in the flood season.

The sluicing operation of Roseires Dam has resulted in a trap efficiency of 46 % to 57 %, much less than the estimated 83 % under condition of storage operation (*Mahmood, 1987*).

The efficiency of sluicing is lower compared to the Old Aswan Dam, mainly because of the greater width (13.5 km) of the Roseires Reservoir and the related

Roseires et de la capacité de transport de sédiments plus faible. Une grande quantité des charges solides est déposée sur les rives, même pendant les opérations de lâchure.

– Le **barrage Bhatgarh** (Inde) a été mis en service en 1892 (*Singh, 1987*) avec un coefficient de capacité de stockage/volume d'écoulement de 0,125. Des sédiments sont évacués au début de la période des crues, lorsque se présentent les plus forts apports solides, au moyen de 20 vannes de fond, ayant une capacité totale de 566 m³/s.

– Le **barrage Matatila** (Inde) a été mis en service en 1956, avec une capacité initiale de retenue de 1,13 x 10⁹ m³. Des opérations de lâchure ont abaissé le taux de captage de 90 à 70 %, ce qui est réalisé en évacuant les premiers débits de pointe de la saison des crues sans remplissage (*Gupta et Singhal, 1981*).

– De nombreuses retenues en Chine, situées sur des rivières avec transports solides, sont exploitées en pratiquant des lâchures, et des capacités de stockage à long terme, relativement importantes, sont réalisées comme l'indique le Tableau 1 (*Xia et al. 1980*). *Brak* (1985) examine les opérations de lâchure aux retenues Heisonglin, Honglingjin et Sanmexia.

Tableau 1
Caractéristiques de retenues Chinoises soumises à des opérations de lâchure

Retenue	Capacité initiale de retenue (millions m ³)	Capacité à long terme (millions m ³)	Proportion (%) de la capacité à long terme par rapport à la capacité initiale	Type de retenue
Sanmenxia	5 930	2 300-2 600	39-44	Gorge
Yanguoxia	220	60	27	
Naodehai	183	110-120	60-66	Gorge
Zhengziliang	36	4-5	11-14	Lac
Heisonglin	8,6	2-2,5	23-29	
Boajixia	5,1	1	20	
Honglingjin	16,6	3-4	18-24	

3.2. ÉVACUATION PAR COURANTS DE DENSITÉ

3.2.1. Généralités

Dans des conditions exceptionnelles, des courants de densité induits par les apports solides se forment, conduisant à un transport plus important de sédiments vers le barrage que celui donné par les formules applicables au transport en suspension par turbulence. Si des ouvrages d'évacuation appropriés sont installés, le courant contenant de fortes concentrations de sédiments peut être évacué à travers

lower sediment transport capacity. A great deal of the sediment load is therefore deposited on the overbank areas, even during sluicing operation.

– The **Bhatgarh Dam** was constructed in 1892 in India (*Singh, 1987*) with a storage capacity to run-off ratio of 0.125. Sediment is sluiced during the first flows of the flood season, when the highest sediment loads occur by means of 20 deep sluice gates with a total capacity of 566 m³/s.

– **Matatila Dam** was constructed in 1956 in India with an original full supply capacity of 1.13 x 10⁹ m³. Sluicing operation lowered the trap efficiency from 90 % to 70 % and is accomplished by releasing the first flood peak of the flood season without impounding (*Gupta and Singhal, 1981*).

– Many reservoirs in **China** on sediment-laden rivers are operated by sluicing operations and relatively large long-term storage capacities are realized as indicated in Table 1 (*Xia et al., 1980*). *Brak* (1985) discusses sluicing operations at Heisonglin, Honglingjin and Sanmenxia Reservoirs.

Table 1
Chinese reservoir characteristics with sluicing operation

Reservoir	Original capacity (million m ³)	Long-term capacity (million m ³)	Ratio of long-term to original capacity (%)	Type of reservoir
Sanmenxia	5 930	2 300-2 600	39-44	Gorge
Yanguoxia	220	60	27	
Naodehai	183	110-120	60-66	Gorge
Zhengziliang	36	4-5	11-14	Lake
Heisonglin	8.6	2-2.5	23-29	
Boajixia	5.1	1	20	
Honglingjin	16.6	3-4	18-24	

3.2. VENTING OF DENSITY CURRENTS

3.2.1. General

Under exceptional conditions, sediment-induced density currents develop which would cause more sediment to be transported towards the dam than the relationships for turbulent suspension would indicate. If suitable outlets are provided, the stream containing high sediment concentrations can be discharged through dams. Density current venting is an attractive way of releasing sediment-

le barrage. L'évacuation par courants de densité est un moyen attrayant de décharger d'une retenue des débits chargés de sédiments, car, à la différence des opérations de lâchure/chasse, il n'est pas nécessaire d'abaisser le niveau de retenue.

3.2.2. Conditions aux limites

Les conditions favorables à l'évacuation d'apports solides par courants de densité sont les suivantes (Brük, 1985; Lu, 1990; Rooseboom, 1985; Scheuerlein, 1987; Basson, 1996) :

- Retenue de faible longueur, présentant une configuration étroite et une forte pente du lit.

- Lorsqu'un lit mineur existe au fond d'une retenue, on a constaté que le taux d'évacuation par le courant de densité était le double de celui correspondant au cas d'une retenue sans lit mineur (Retenue Hengshan, Chine) (Zhou *et al.*, 1989; Brük, 1985). L'évacuation par courant de densité dans une nouvelle retenue est donc souhaitable et peut réduire l'alluvionnement du lit mineur (Singh, 1987). Le dépôt de sédiments dans une retenue est défavorable à la formation d'un courant de densité car la pente de ce dépôt à l'extrémité amont est inférieure à la pente initiale du lit de la rivière (Mahmood, 1987).

- Apports solides importants avec fortes teneurs en sédiments fins.

- Différences élevées de densité.

- Grandes profondeurs d'écoulement.

- Faibles vitesses d'écoulement.

- Teneurs élevées en éléments fins dans les courants de densité. Selon Mahmood (1987), des études *in situ* et en laboratoire indiquent que la floculation des particules d'argile n'entraîne pas de dépôt d'argile en dehors du courant de densité.

- Des ouvrages d'évacuation de grandes dimensions, situés à niveau bas, avec des temps d'ouverture et de fermeture des vannes bien étudiés. Un tuyau de prélèvement d'échantillons dans la retenue peut être utilisé pour mesurer les teneurs en sédiments (Lu, 1990). Si le courant de densité n'est pas évacué, une tranche boueuse se formera avec risque de blocage des pertuis et des vannes. Si le niveau supérieur du pertuis d'entrée de l'évacuateur de fond est inférieur au niveau supérieur du courant de densité, le rapport de la concentration du débit sortant à la concentration du débit entrant augmente.

Les lâchures ne doivent pas dépasser le taux de transfert de masse du courant de densité, la raison étant qu'un taux d'évacuation supérieur pourrait entraîner une interaction turbulente qui serait prédominante dans le mécanisme de transport. Il en résulterait un mélange et une dilution (Comité Français des Grands Barrages, Groupe de travail, 1982; Rooseboom, 1985).

Dans plusieurs grandes retenues, dont la capacité de stockage a été prévue pour faire face à 100 ans d'alluvionnement, l'évacuation par courants de densité n'a pas de grandes applications pratiques car le déplacement des sédiments depuis la zone supérieure de la retenue se produit le long du talus frontal jusqu'à la ligne de pente du fond, ou dans la zone inférieure de la retenue. Il s'agit uniquement d'un déplacement de sédiments d'une zone de la retenue à une autre. Comme les dépôts

laden flows from a storage reservoir particularly as unlike with flushing/slucicing operations, it is not necessary to lower reservoir pool levels.

3.2.2. Boundary conditions

Favourable conditions for venting sediment-laden density currents are (*Brak*, 1985; *Lu*, 1990; *Rooseboom*, 1985; *Scheuerlein*, 1987; *Basson*, 1996):

- Short reservoir with steep bed slope and narrow basin configuration.

- When a main channel exists at the bottom of a reservoir, the release ratio of the density current has been found to be twice the ratio without a channel (Hengshan Reservoir, China) (*Zhou et al.*, 1989; *Brak*, 1985). Density current venting in a new reservoir is therefore desirable and can reduce sedimentation of the main channel (*Singh*, 1987). Advanced sediment build-up in a reservoir works against the development of a density current because the topside slope of the deposit is smaller than the original river-bed slope (*Mahmood*, 1987).

- Large incoming discharge with high concentrations of fine sediment.
- Large density differences.
- Large flow depths.
- Low flow velocities.

- High concentration of fine particles in density current. According to *Mahmood* (1987) field and laboratory studies indicate that flocculation of clay particles does not induce settlement of clay out of the density current.

- Large, low level outlets and correct timing of opening and closing of outlets. A sampling pipe in the reservoir could be used to monitor sediment concentrations (*Lu*, 1990). If the density current is not vented, a muddy pool will develop which can block inlets and gates. If the elevation of the top of the entrance to the bottom outlet is lower than the top of the density current, the ratio of outflow to inflow concentration increases.

Releases should not be in excess of the mass transfer rate of the density current, the reason being that larger discharge rates could cause turbulent interaction to dominate in the transport mechanism. As a result mixing and dilution would take place (*Comité Français des Grands Barrages, Groupe de Travail*, 1982; *Rooseboom*, 1985).

For many larger reservoirs that are designed with adequate capacity for 100-year sediment storage, density current venting does not have significant practical application because movement of sediment from the upper reaches of the reservoir takes place along the foreset slope to the bottomset slope or into the lower portion of the reservoir. This is only a shifting of sediment from one location within a reservoir to another location. As the delta deposits encroach upon the storage

du delta empiètent sur la capacité de stockage, le mouvement de ces sédiments a plus d'importance au cours des derniers stades de leur dépôt. Les courants de densité pourraient alors faire passer des sédiments par les évacuateurs de fond du barrage.

3.2.3. Méthode de calcul des courants de densité

La présence de courants de densité dans des retenues a conduit à un certain nombre d'études théoriques et de mesures in situ. Parmi les auteurs de telles études, on peut citer : *Bell* (1942), *Keulegan* (1944), *Kuenen et al.* (1950), *Geza et al.* (1953), *Howard* (1953), *Schiff et al.* (1953), *Fan et al.* (1960, 1962, 1985, 1992), *Middleton* (1966), *Benjamin* (1968), *Savage et Brimberg* (1975), *Kao* (1977), *Yih* (1980), *Graf* (1983), *Lu* (1992), etc.

Lors de l'étude de la possibilité d'utiliser des courants de densité, comme moyen de maîtrise de l'alluvionnement des retenues, il est nécessaire de déterminer :

- (i) si un courant de densité se formera dans les conditions aux limites données
- (ii) la capacité de transport de sédiments du courant de densité
- (iii) la configuration et l'exploitation de l'ouvrage d'évacuation.

Pour une évacuation efficace par un courant de densité, on doit tout d'abord analyser les caractéristiques du mouvement du courant de densité dans la retenue, prévoir l'épaisseur, le débit et la concentration des sédiments. À partir de ces éléments, le niveau, les dimensions et le débit de l'évacuateur de fond peuvent être déterminés correctement. Diverses méthodes de calcul empiriques sont disponibles à cet effet.

Les conditions favorables à la formation d'un courant de densité peuvent être estimées au moyen des critères suivants, en supposant de faibles vitesses d'écoulement et de fortes teneurs en sédiments des apports :

$$\frac{\Delta\rho \cdot S_0}{\rho \cdot S_f} < 1,0 \quad (\text{Puissance de courant minimale}) \quad (\text{Basson, 1996})$$

$$\frac{S_0 \cdot C_h^2 \cdot D^5}{Q^2} > 10\,000 \quad (\text{Rooseboom, 1975})$$

où :

S_0 : pente moyenne du lit de la retenue

D : profondeur moyenne de la retenue

C_h : coefficient de rugosité de Chézy

$\Delta\rho$: différence de masse volumique entre le courant de densité et l'eau claire située au-dessus

Q : débit

S_f : pente de la ligne de charge de la rivière

ρ : masse volumique de l'eau claire.

capacity, the movement of these sediments is more critical in the later stages of sediment deposition. Density currents could then move sediments through bottom outlets at the dam.

3.2.3. Density current calculation procedure

Field experience with density currents in reservoirs have led to a number of theoretical studies and prototype measurements by many authors such as *Bell* (1942), *Keulegan* (1944), *Kuenen et al.* (1950), *Geza et al.* (1953), *Howard* (1953), *Schiff et al.* (1953), *Fan et al.* (1960, 1962, 1985, 1992), *Middleton* (1966), *Benjamin* (1968), *Savage and Brimberg* (1975), *Kao* (1977), *Yih* (1980), *Graf* (1983), *Lu* (1992), etc.

In determining the feasibility of density current venting as reservoir sedimentation control measure, it is necessary to establish :

- (i) whether a density current will develop with given boundary conditions
- (ii) the sediment carrying capacity of the density current
- (iii) outlet configuration and operation.

For effective venting of a density current, one should firstly analyse the characteristics of the movement of the density current in a reservoir, predict the thickness, discharge and sediment concentration. Based on this knowledge the elevation, dimension and discharge of the bottom outlet can be properly designed. Some empirical calculation methods are available for this purpose.

Conditions favourable for density current formation can be estimated by the following criteria, with the assumption of low flow velocities and high inflow sediment concentrations :

$$\frac{\Delta\rho \cdot S_0}{\rho \cdot S_r} < 1.0 \quad (\text{Minimum streampower}) \quad (\text{Basson, 1996})$$

$$\frac{S_0 C_b^3 D^5}{Q^2} > 10\,000 \quad (\text{Rooseboom, 1975})$$

with

S_0 : average bed slope of reservoir

D : average reservoir depth

C_b : Chézy roughness coefficient

$\Delta\rho$: density difference between density current and clear fluid above

Q : discharge

S_r : energy slope of inflowing river

ρ : mass density of clear water

L'existence d'un point de plongée (point situé dans la partie supérieure de la retenue où le courant de la rivière s'enfonce dans l'eau de la retenue) est considérée comme une condition nécessaire à la formation du courant de densité et peut être identifiée par le nombre de Froude densimétrique Fr (Fan, 1985; Akiyama et Stephan, 1984; Mahmood, 1987) :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot gH_0}}$$

où :

V : vitesse moyenne au point de plongée

H_0 : profondeur d'eau au point de plongée

ρ : masse volumique de l'eau claire

$\Delta\rho$: différence de masse volumique entre l'eau entrante chargée de sédiments et l'eau stockée

g : accélération due à la pesanteur

Les valeurs proposées pour Fr varient beaucoup :

Tableau 2 - Nombres de Froude densimétriques pour la prévision de la formation de courants de densité

Fr	Référence
0,78	Fan (1985); Zhang Hao et al (1976)
0,50	Mahmood (1987)
0,3 - 0,8	Savage et Brimberg (1975)
0,6 - 0,8	Akiyama et Stephan (1984)

Le rapport de la profondeur au point de plongée (H_0) à la profondeur du courant de densité (H_2) est approximativement égal à (Fan, 1960) :

$$\frac{H_0}{H_2} = 0,64Fr^{0,76}$$

Mahmood (1987) indique que la vitesse d'un courant de densité peut être estimée à partir de l'équation de frottement de Darcy-Weisbach, pour des conditions d'écoulement uniforme :

$$\frac{V}{\sqrt{gH_2S_0}} = \frac{\sqrt{8}}{f}$$

où :

S_0 : pente du lit

f : coefficient de frottement = 0,025 à 0,030

The existence of a plunge point (the point in the upper reservoir reaches where the river flow dives under the reservoir water), is seen as a necessary condition for the formation of the density current and can be identified by the densimetric Froude Number (Fr) (*Fan, 1985; Akiyama and Stephan, 1984; Mahmood, 1987*):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot gH_0}}$$

where

V : average velocity at plunge point

H₀ : water depth at plunge point

ρ : density of clear water

Δρ : density difference between sediment laden inflow and impounded water

g : gravitational acceleration

The suggested values for Fr vary considerably:

Table 2 - Typical densimetric Froude numbers for prediction of density current formation

Fr	Reference
0.78	Fan (1985); Zhang Hao et al (1976)
0.50	Mahmood (1987)
0.3 - 0.8	Savage and Brimberg (1975)
0.6 - 0.8	Akiyama and Stephan (1984)

The ratio of depth at the plunge point (H₀) to that in the density current (H₂) is roughly given by (*Fan, 1960*):

$$\frac{H_0}{H_2} = 0.64Fr^{0.76}$$

Mahmood (1987) indicates that the velocity of a density current can be estimated from the Darcy-Weisbach friction equation for uniform flow conditions:

$$\frac{V}{\sqrt{gH_2S_0}} = \frac{\sqrt{8}}{f}$$

with:

S₀ : the bed slope

f : friction factor = 0.025 to 0.030

Des modèles de turbulence et d'intégration suivant les couches ont été établis; ils simulent des courants de densité avec érosion et dépôts de sédiments, et des courants de densité sans échange de sédiments (*Sloff, 1991*).

3.2.4. Exemples

Des observations in situ portant sur le rapport du débit solide évacué au débit solide entrant sont données dans le Tableau 3 (*Bruk, 1985; Delft Hydraulics, 1992; Tan, 1994; Mahmood, 1987*).

Tableau 3 - Rapports du débit solide sortant au débit solide entrant, enregistrés lors de l'évacuation de courants de densité

Retenue	Pays	Capacité de la retenue (million m ³)	Longueur de la retenue (km)	Rapport : débit solide sortant au débit solide entrant
Eril Emda	Algérie	160		0,25 - 0,60
Lake Mead	États-Unis	38 400	128	0,18 - 0,39
Guanting	Chine	2 270		0,19 - 0,34
Heisonglin	Chine	8,6	2	0,16 - 0,59
Sanmenxia	Chine	5 930	80 (1961)	0,18 - 0,21
Sefid Rud	Iran	1 800 (à l'origine)		0,20 - 0,37
Fengjiashan	Chine	398	12 - 14	0,23 - 0,65
Bajiazui	Chine	525 (à l'origine)		0,46
Liujiaxia	Chine	5 720 (à l'origine)		0,57 - 0,84
Nebeur	Tunisie	300		0,59-0,64

– Retenue Bajiazui, Chine

Cette retenue étroite de 10 km de longueur et de 400 à 600 m de largeur a été mise en eau en 1962. Les apports moyens annuels d'eau et de sédiments sont respectivement de 104 millions de m³ et de 25,5 tonnes. Le pourcentage moyen de sédiments évacués par le courant de densité est de 46 % (*Jiao et Liao, 1989*).

– Retenue Sefid Rud, Iran

Bien que l'évacuation par courant de densité fût appliquée de 1962 à 1981, la capacité initiale de retenue de 1,8 x 10⁹ m³ (1962) fut réduite à 1 x 10⁹ m³ en 1980. Sur des apports solides de 40 à 50 millions de tonnes par an en moyenne, 6 millions de tonnes étaient évacués par an par les courants de densité (*Parhami, 1986; Amini et Fouladi, 1985*). Le pourcentage moyen d'évacuation au cours des périodes de crue était de 30 %, avec une teneur maximale en sédiments de 25 kg/m³.

Layer-integrated and turbulence models have been developed which simulate erosive and depositing density currents and density currents without sediment exchange (Sloff, 1991).

3.2.4. Case studies

Field data of the ratio of outflowing sediment load to incoming load are presented in Table 3 (Bruk, 1985; Delft Hydraulics, 1992; Tan, 1994; Mahmood, 1987).

Table 3 - Recorded ratios of outflow to inflow sediment load in density current venting

Reservoir	Location	Storage capacity (million m ³)	Reservoir Length (km)	Ratio: sediment outflow to incoming load
Eril Emda	Algeria	160		0.25 - 0.60
Lake Mead	USA	38 400	128	0.18 - 0.39
Guanting	China	2 270		0.19 - 0.34
Heisonglin	China	8.6	2	0.16 - 0.59
Sanmenxia	China	5 930	80 (1961)	0.18 - 0.21
Sefid Rud	Iran	1 800 (original)		0.20 - 0.37
Fengjiashan	China	398	12 - 14	0.23 - 0.65
Bajiazui	China	525 (original)		0.46
Liujiaxia	China	5 720 (original)		0.57 - 0.84
Nebeur	Tunisia	300		0.59-0.64

- Bajiazui Dam, China

Is a narrow reservoir 10 km in length and 400 m to 600 m wide, completed during 1962. The mean annual run-off and sediment inflow are 104 million m³ and 25.5 tons respectively. The density current venting average release ratio is 46 % (Jiao and Liao, 1989).

- Sefid Rud Reservoir, Iran

Although density current venting was applied from 1962 to 1981, the original storage capacity of 1.8×10^9 m³ (1962) was reduced to 1×10^9 m³ by 1980. Of the average incoming sediment load of 40 million to 50 million tons per year, 6 million tons were released per year by density current venting (Parhami, 1986; Amini and Fouladi, 1985). The average release ratio during flood periods was 30 %, with a maximum sediment concentration of 25 kg/m³.

– **Retenue Liujiaxia, Chine**

À la retenue Liujiaxia, on a constaté que la vitesse du courant de densité était inversement proportionnelle à la teneur en sédiments, sans relation significative avec le débit entrant (*Pu et Su, 1980*).

– **Lac Mead, États-Unis (*Howard, 1953*)**

Un exemple classique de variations de concentration liées à des courants de densité induits par des sédiments est celui observé au Lac Mead en 1940 :

Tableau 4 - Courants de densité observés au Lac Mead

Cote (m)	Teneur en sédiments (%)
317 (plan d'eau)	–
214,27	0,14
214,12	21,3
213,96	27,0
213,05	28,2
190 (lit)	–

Sur une période de 1 mois 1/2, 8,5 millions de tonnes de sédiments furent évacués après un parcours de près de 200 km à travers le Lac Mead (*Bell, 1942*). Dans le Lac, 90 % des sédiments contenus dans les courants de densité étaient inférieurs à 0,02 mm et 76 % inférieurs à 0,005 mm. Le courant de densité se déplaçait à une vitesse de 0,21 m/s, avec des densités relatives de 1,006 à 1,02 (*Gould, 1960*).

– **Retenue Guanting (*Fan, 1960*)**

À une vitesse de 0,2 m/s, 90 % des sédiments transportés par les courants de densité étaient inférieurs à 0,13 mm et 50 % inférieurs à 0,003 mm.

Bruk (1985) examine l'évacuation des courants de densité aux retenues Elephant Butte, Lac Mead, Eril Emda, Guanting, Sanmenxia, Fengjiashan et Nebeur.

– **Liujiaxia Reservoir, China**

At Liujiaxia Reservoir it was found that the velocity of the density current was inversely proportional to the sediment concentration, but not significantly related sensitively to the inflow (*Pu and Su, 1980*).

– **Lake Mead, USA (*Howard, 1953*)**

A classical example of concentration variations associated with sediment-induced density current are those which were observed in Lake Mead in 1940 :

Table 4 - Observed density current in Lake Mead

Elevation (m)	Sediment concentration (%)
317 (water surface)	–
214.27	0.14
214.12	21.3
213.96	27.0
213.05	28.2
190 (bed)	–

Over a period of 1 1/2 months, 8.5 million tons of sediment were vented after travelling nearly 200 km through Lake Mead (*Bell, 1942*). In Lake Mead 90 % of the sediment in the density current sediment was smaller than 0.02 mm and 76 % smaller than 0.005 mm. The density current moved at 0.21 m/s with relative densities of 1.006 to 1.02 (*Gould, 1960*).

– **Guanting Reservoir (*Fan, 1960*)**

At a velocity of 0.2 m/s, 90 % of the sediment transported by density currents was smaller than 0.13 mm and 50 % smaller than 0.003 mm.

Brak (1985) discusses density current venting at Elephant Butte, Lake Mead, Eril Emda, Guanting, Sanmenxia, Fengjiashan and Nebeur Reservoirs.

4. ENLÈVEMENT DES DÉPÔTS DE SÉDIMENTS ACCUMULÉS DANS LES RETENUES

Les sédiments accumulés peuvent être enlevés des retenues par des opérations de chasse (érosion) ou par excavation.

4.1. CHASSE

4.1.1. Généralités

La chasse des sédiments est une technique dans laquelle les vitesses d'écoulement dans une retenue sont augmentées afin de remobiliser les sédiments déposés et de les évacuer à travers les évacuateurs de fond. Très souvent, les lâchures et les chasses sont utilisées en association ou alternativement.

Au cours de l'opération de chasse, un chenal est creusé à travers les dépôts de sédiments. La largeur et la pente du chenal approcheront de celles qui existaient dans les conditions de régime initial, avec des opérations de chasse périodiques. Le processus d'érosion au cours d'une chasse, avec baisse du niveau de retenue, est décrit par *Zhang et Qian* (1985) : lorsque le niveau de retenue est abaissé au-dessous du point saillant du delta, une érosion régressive se produit jusqu'à ce que la pente frontale et la pente de la partie supérieure du delta s'égalisent. Par la suite, une érosion progressive prend place avec une intensité décroissant au fur et à mesure que la pente du fond diminue. L'érosion régressive est généralement plus forte que l'érosion progressive et joue donc un rôle plus important dans la chasse des sédiments d'une retenue.

En ce qui concerne les vannes, la différence principale par rapport aux opérations de lâchure est que, pour les opérations de chasse, les vannes doivent être situées près du lit initial de la rivière. Comme dans le cas des lâchures, les chasses nécessitent un volume d'écoulement excédentaire. Dans les régions arides et semi-arides, les opérations de chasse conduisent souvent à d'importantes pertes d'eau inacceptables. Les opérations de lâchure/chasse augmentent donc les risques de pénurie dans la fourniture d'eau au cours des périodes hydrologiques critiques (*Brabben*, 1988; *White et Bettes*, 1984). Des chasses ne peuvent être également effectuées dans des retenues à remplissage pluriannuel ou dans celles dont l'utilisation ne peut tolérer des interruptions périodiques (*White et Bettes*, 1984). Dans de tels cas, les risques peuvent être réduits en organisant l'exploitation d'un ensemble de retenues.

4.1.2. Conditions aux limites

L'efficacité des chasses dépend des facteurs suivants :

- géométrie de la retenue (pente, largeur, longueur, taux de stockage),
- capacité de débit, géométrie, emplacement et niveau des ouvrages d'évacuation,

4. REMOVAL OF ACCUMULATED SEDIMENT DEPOSITS

Sediment can be scoured from reservoirs by flushing operation or removed by excavation.

4.1. FLUSHING

4.1.1. General

Sediment flushing is a technique in which the flow velocities in a reservoir are increased to such an extent that deposited sediments are remobilised and transported through bottom outlets. In many cases sluicing and flushing are used in combination or alternately.

During the flushing process a river channel is eroded through the sediment deposits. The width and slope of the channel will approach those which existed under the original regime conditions with periodic flushing operations. The erosion process during drawdown flushing is described by *Zhang and Qian* (1985): When the reservoir water level is drawn down below the apex point of the delta, retrogressive erosion will result until the foreset slope and topset slope of the delta are equal. Thereafter progressive erosion takes place with decreasing intensity as the bottom slope decreases. Retrogressive erosion is usually more dominant than progressive erosion and therefore more important in reservoir desiltation.

The main difference between sluicing and flushing requirements for gates is that the gates for flushing operation should be close to the original river-bed level. As in the case of sluicing, excess run-off is required for successful flushing operation. In semi-arid and arid regions flushing operation often results in unacceptably high water losses. Flushing/sluicing operation therefore increases the risk of failure of water supply during critical hydrological periods (*Brabben*, 1988; *White and Bettes*, 1984). Flushing operation also can not be implemented in reservoirs with over-year storage or where periodic interruptions in the use of the reservoir cannot be tolerated (*White and Bettes*, 1984). In such cases the risks can be reduced by operating reservoirs in combination with each other.

4.1.2. Boundary conditions

The efficiency of flushing depends on :

- geometry of the reservoir (slope, width, length, storage ratio),
- outlet discharge capacity, geometry, location and elevation,

- caractéristiques des apports solides et des dépôts,
- mode d'exploitation,
- durée et débit des chasses.

Les conditions favorables aux chasses sont les suivantes (*Bruk, 1985; Paul et Dhillon, 1988; Delft Hydraulics, 1992*) :

- Faible charge sur les ouvrages d'évacuation, de préférence avec conditions d'écoulement libre. La chasse de sédiments est plus efficace lorsque le niveau de retenue est abaissé jusqu'à ce que les conditions d'écoulement sur les dépôts soient peu différentes de celles de la rivière à l'origine (écoulement à surface libre) (*White et Bettes, 1984; Mahmood, 1987*). La condition la plus propice pour commencer une opération de chasse est donc une retenue vide. Une chasse sans baisse du niveau de retenue est pratiquée lorsqu'une érosion locale des sédiments aux prises d'eau est demandée. Un cratère en forme d'entonnoir se creuse, l'érosion se terminant dès que la pente du cratère atteint l'angle de talus naturel. Une chasse sans baisse du plan d'eau a seulement cet effet localisé car les vitesses diminuent grosso modo proportionnellement au carré de la distance à partir des ouvrages d'évacuation (*Scheuerlein, 1993*).

- Débits d'évacuation élevés.
- Dépôts de sédiments sans cohésion, non consolidés, sans gravier ni matériaux de pavage.
- Évacuateurs de fond de grande largeur.
- Ouvrages d'évacuation profonds, de préférence situés au niveau du lit initial de la rivière.

- Longue durée de chasse et chasses intermittentes. Dans une retenue de grande longueur, une baisse notable du plan d'eau pendant plusieurs mois est nécessaire pour parfaire l'action de chasse, à cause des modifications lentes du lit. En général, les teneurs en sédiments des débits évacués sont élevées au début de l'érosion régressive et diminuent ensuite progressivement dans le temps. La chasse sera arrêtée lorsque les teneurs en sédiments évacués seront faibles, en vue d'économiser l'eau. Dans les régions semi-arides, la chasse des crues ordinaires (d'une durée de quelques heures à quelques jours) est possible si l'on dispose d'un excès d'eau et si l'on contrôle le volume d'eau entrant afin que la retenue soit pleine à la fin de la crue. Dans de tels cas, le remplissage de la retenue uniquement au cours de la phase descendante de l'hydrogramme de crue limitera l'alluvionnement.

- Faible rapport capacité de retenue/volume des apports d'eau afin de fournir un excès d'eau pour la chasse.

- Forte pente du fond. Les pentes du lit sont de l'ordre de 2 % dans la plupart des retenues où des chasses ont été pratiquées avec succès (*Singh, 1987*).

- Retenue étroite. *Singh (1987)* indique que les retenues où des chasses ont été effectuées avec succès présentent des largeurs ne dépassant pas 300 m. Avec des chasses périodiques, le chenal creusé se rapprochera de la largeur initiale de la rivière. Dans les retenues s'étendant sur des lits majeurs, il n'est donc possible de récupérer qu'un stockage se limitant au lit d'écoulement initial (*Mahmood, 1987*).

- Climat avec saisons sèches et humides distinctes, ce qui permet des chasses au début de la saison humide où les débits ont de fortes charges en sédiments, et un stockage de l'eau dans la saison sèche.

- characteristics of inflowing and deposited sediment,
- mode of operation,
- duration of flushing and flushing discharge.

Favourable conditions for effective flushing are (*Brak, 1985; Paul and Dhillon, 1988; Delft Hydraulics, 1992*) :

- Low head on the outlets, preferably free flow conditions. Sediment flushing is most effective when the reservoir is drawn down to the extent that the flow condition over the deposits approach that of the original river (free surface flow) (*White and Bettes, 1984; Mahmood, 1987*). The best condition for starting the flushing operation is therefore an empty reservoir. Flushing without water level drawdown is practised where localized scour of sediment at intakes is required. A funnel-shaped crater develops which terminates as soon as the slope of the crater is equal to the angle of repose. Flushing without drawdown has only this local effect because velocities decrease approximately proportional to the square of the distance from the outlets (*Scheuerlein, 1993*).

- High discharges.
- Unconsolidated non-cohesive deposits, no gravel and no armouring.
- Wide bottom outlet(s)
- Deep outlet location, preferably at the original river-bed level.

- Long duration of flushing and intermittent flushing. In a long reservoir an appreciable drawdown for several months is needed to complete the flushing action, because of the low rate of bed changes. Generally outflow concentrations are high at the beginning of retrogressive erosion and gradually decrease with time. Flushing should be stopped when outflow concentrations are low in order to save water. In semi-arid regions flushing of single flood events (few hours to days) is possible if excess water is available and the inflow volume is monitored in order to end with a full reservoir after the flood. In such cases impounding only during the falling stage of the flood hydrograph will limit sedimentation.

- Small reservoir capacity: inflow storage ratio to provide excess run-off for flushing.

- Steep bottom slope. Bed slopes are approximately 2 % in most reservoirs where flushing has been practised successfully (*Singh, 1987*).

- Narrow reservoir. *Singh (1987)* concludes that a maximum reservoir width of 300 m is found in reservoirs where flushing is successfully used. With periodic flushing the scoured channel will approach the original river width. In flood-plain type of reservoirs therefore, it is only possible to recover storage up to the extent of the original channel (*Mahmood, 1987*).

- A climate with distinct dry and wet seasons, allowing flushing operation in the early wet season when flows are highly charged with sediments, and storing water in the dry season.

– Chasses fréquentes. Des chasses seront pratiquées fréquemment pour prévenir une consolidation excessive des dépôts (*Delft Hydraulics*, 1992). *Krumdieck et Chamot* (1979) ont recommandé une chasse au moins une fois chaque année pour la retenue Santo Domingo, Venezuela. Lorsqu'on associe des lâchures et des chasses, la fréquence des chasses peut être moindre (*Brak*, 1985). En Chine, l'alluvionnement annuel est réduit au moyen de lâchures tandis que des chasses sont exécutées tous les 3 à 5 ans, comme par exemple dans la retenue Hengshan (*Zhou et al.*, 1989).

Il peut s'avérer nécessaire de faire des chasses plus fréquentes, si possible. Dans les aménagements hydroélectriques russes en cascade sur la rivière Rioni, une fréquence de chasse de deux fois par an a été adoptée. À la fin de l'automne, les retenues font l'objet de chasses, c'est-à-dire avant l'hiver où la demande d'énergie est forte, et de nouveau après l'hiver pour enlever les dépôts consolidés plus légers (*Kereslidze et al.*, 1985). À la retenue Hengshan, Chine, les chasses ont été très efficaces même lorsque le lit mineur, érodé au cours d'une précédente chasse, avait été comblé de sédiments au cours d'une période de plusieurs (4 ou 5) années.

– Retenue d'alimentation en eau plutôt que retenue hydroélectrique. La production d'énergie hydraulique serait considérablement diminuée du fait de la baisse du niveau de retenue et, à moins d'être programmé à l'origine, cela peut être inacceptable pour la satisfaction des besoins en énergie. À la retenue Sanmenxia, la production d'énergie fut réduite à 1/3 par rapport à celle initialement prévue, en raison de l'alluvionnement qui nécessita un changement des consignes d'exploitation de la retenue.

– Association avec d'autres mesures telles que le dragage.

Outre la perte d'eau, les chasses peuvent avoir également d'autres effets négatifs (*Qian*, 1982; *Yoon*, 1991; *Mahmood*, 1987) :

– Une baisse rapide du niveau de retenue peut conduire à des glissements des dépôts de sédiments, qui peuvent bloquer les ouvrages d'évacuation, ou réduire la capacité de stockage, de même que mettre en danger la sécurité des barrages en terre.

– Des évacuations importantes de sédiments peuvent causer des remblaiements dans le lit de la rivière à l'aval (*Qian et al.*, 1993).

– Les sédiments évacués peuvent produire une abrasion des ouvrages d'évacuation.

– Les évacuations à fortes teneurs en sédiments peuvent affecter la qualité de l'eau et le milieu écologique le long des tronçons aval.

Le rapport eau/détritus évacués, c'est-à-dire le rapport entre le volume d'eau utilisée et le volume de dépôts solides chassés est l'un des indicateurs de l'efficacité de la chasse. Ce rapport varie généralement de 20 à 50 comme l'indique le Tableau 5 concernant des observations in situ (*Qian*, 1982; *Fan*, 1985; *Yoon*, 1991).

Un cas particulier de chasse concerne l'opération de rétention des crues. En général, les dépôts de sédiments résultant de la rétention des crues peuvent être chassés au cours de la phase descendante de la crue ou au cours de la prochaine crue, à travers des évacuateurs de fond de grandes dimensions, avec ou sans vannes. La plus grande partie de l'érosion régressive qui en résulte se produit cependant dans le lit mineur, et non sur les dépôts dans le lit majeur (*Fan*, 1985).

– Frequent flushing. Flushing should be undertaken frequently to prevent excessive consolidation of deposits (*Delft Hydraulics*, 1992). *Krumdieck and Chamot* (1979) recommended a flushing frequency of at least once every year for the Santo Domingo reservoir, Venezuela. When sluicing and flushing are used in combination, the frequency of flushing may be less (*Bruk*, 1985). In China annual sedimentation is restricted by sluicing while flushing is applied every 3 to 5 years for example in the Hengshan Reservoir (*Zhou et al.*, 1989).

It may be necessary to flush even more frequently if possible. In the Russian Rioni series of hydro-electric stations a flushing frequency of twice a year was adopted. In late autumn the reservoirs are flushed before winter when power demand is high, and again after winter to remove the lighter consolidated deposits (*Kereselidze et al.*, 1985). At the Hengshan Reservoir, China, the flushing efficiency was high even when the main channel, eroded in a previous flushing, had been silted by sediments during a period of several (4 or 5) years.

– Water supply rather than hydro power system. Hydro power generation will be decreased considerably due to water level drawdown, and unless originally planned for, this could be unacceptable in terms of power requirements. At Sanmenxia Reservoir power generation was reduced to one third of what was originally planned due to sedimentation which necessitated a change in reservoir operation rules.

– Combination with other measures like dredging.

Apart from loss of water, flushing could also have other negative effects (*Qian*, 1982; *Yoon*, 1991; *Mahmood*, 1987):

– Rapid reservoir drawdown could lead to sediment slides which can block the outlets or reduce storage as well as jeopardize the safety of especially earth dams.

– High sediment releases may cause aggradation of the downstream river channel (*Qian et al.*, 1993).

– Sediment being discharged may cause abrasion of the outlets.

– High concentration sediment releases may affect the water quality and ecological environment along downstream reaches.

The water-detritus ratio (W-D), the ratio between the volume of water wasted and the volume of deposits flushed out, is one of the indicators of flushing efficiency. The W-D ratio typically varies between 20 to 50 as indicated by field data in Table 5 (*Qian* 1982, *Fan* 1985, *Yoon*, 1991).

A special case of flushing is found in flood detention operation. Normally the sediment deposition caused by flood detention can be flushed out during the receding flood phase or during the next flood through large bottom outlets with or without gates. Most of the resulting headward retrogressive erosion occurs in the main channel however, and not in the flood plain deposits (*Fan*, 1985).

Tableau 5 - Rapports eau/détritus enregistrés

Retenue	Pays	Mode opératoire	Rapport eau/détritus
Grimsel	Suisse	Évacuateurs de fond, baisse du plan d'eau	16 - 22
Gebiden	Suisse	Évacuateurs de fond, baisse du plan d'eau	42
Gebiden	Suisse	Évacuateurs de fond, sans baisse du plan d'eau	18
Nebeur	Tunisie	Évacuateur de fond, chasse avec baisse du plan d'eau et décharge par courants de densité	9
Sefid Rud	Iran	Évacuateurs de fond	13 - 34
Khashm El Girba	Soudan	-	35 - 44
Zemo-Afchar	Russie	-	8 - 83
Guernsey	États-Unis	Évacuateur de crue déversant	400 -820
Santo Domingo	Venezuela	Vidange	7 - 11
Shuicaozi	Chine	Évacuateur de crue déversant	23 - 86
Warsak	Pakistan	Évacuateur de crue déversant	590

Deux vitesses de baisse du plan d'eau sont examinées par *Lu* (1991) : baisse rapide ou progressive du niveau de retenue. Un processus d'érosion radiale se produit lors de la baisse rapide du plan d'eau, dans lequel le profil du lit présente une surface de révolution autour d'un axe près de l'ouvrage d'évacuation. La pente du lit diminue progressivement jusqu'à la pente du lit initial, comme cela a été constaté à la retenue Sanmenxia, Chine, en 1962. Une baisse progressive du plan d'eau induit un processus d'érosion par couches, avec un axe de révolution situé près de l'extrémité amont de la retenue, comme cela a été observé à la retenue Sanmenxia en 1964.

Takasu (1982) a constaté qu'une augmentation du débit d'évacuation au cours d'une chasse conduisait à une augmentation des charges solides chassées de la retenue, en raison de l'augmentation de l'érosion des rives du lit mineur dans la retenue, malgré la diminution des concentrations.

4.1.3. Méthode de calcul des opérations de chasse

La capacité de transport du courant de chasse doit dépasser la valeur critique des sédiments déposés qui doivent être chassés; dans le cas de sédiments sans cohésion, non consolidés, des formules relativement simples définissent la condition critique (*Rooseboom et Mulke*, 1982) :

Table 5 - Recorded W-D ratios

Reservoir	Location	Mode of operation	W-D ratio
Grimsel	Switzerland	Bottom outlets, drawdown	16 - 22
Gebiden	Switzerland	Bottom outlets, drawdown	42
Gebiden	Switzerland	Bottom outlets, no drawdown	18
Nebeur	Tunisia	Bottom outlet flushing with drawdown and density current	9
Sefid Rud	Iran	Bottom outlets	13 - 34
Khashm El Girba	Sudan	-	35 - 44
Zemo-Afchar	Russia	-	8 - 83
Guernsey	USA	Overflow spillway	400 - 820
Santo Domingo	Venezuela	Emptying	7 - 11
Shuicaozi	China	Overflow spillway	23 - 86
Warsak	Pakistan	Overflow spillway	590

Two rates of drawdown are discussed by *Lu* (1991): Quick or gradual drawdown of the water level. A radial erosion process is caused by the former in which the bed profile revolves around an axis near the outlet. The bed slope gradually decreases to the original bed slope as was observed in the Sanmenxia Reservoir, China, in 1962. A gradual drawdown induces a layered erosion process with revolving axis located near the upstream end of the reservoir, as observed in Sanmenxia Reservoir in 1964.

Takasu (1982) found that increased outflow rate during flushing resulted in increased flushed sediment load due to increased bank erosion in the main channel in the reservoir, although the concentration decreases.

4.1.3. Flushing operation calculation procedure

The transporting capacity of the flushing stream must exceed the critical value of the deposited sediments to be scoured which can be determined by relatively simple relationships for cohesionless unconsolidated sediments (*Rooseboom and Mulke*, 1982):

Pour les couches limites turbulentes, généralement trouvées dans les retenues, si

$$\frac{\sqrt{gDS_f}}{\nu} \cdot d_{50} > 13$$

le transport solide aura lieu si

$$\frac{\sqrt{gDS_f}}{v_{ss}} > 0.12$$

et si

$$\frac{\sqrt{gDS_f}}{\nu} \cdot d_{50} < 13 \quad (\text{condition de couche limite laminaire})$$

le transport solide des particules lâches aura lieu si

$$\frac{\sqrt{gDS_f}}{v_{ss}} = \frac{1,6}{\frac{\sqrt{gDS_f} \cdot d_{50}}{\nu}}$$

où :

g : accélération due à la pesanteur

D : profondeur de l'écoulement

S_f : pente de la ligne de charge = $\frac{v^2}{C_h^2 R}$ (Chézy) ou $\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}$ (Manning)

ν : viscosité cinématique du fluide = 10⁻⁶ m²/s pour l'eau, pour des raisons pratiques

d₅₀ : dimension moyenne des particules solides

v_{ss} : vitesse de décantation des particules à évacuer.

Si les conditions dans lesquelles les matériaux sans cohésion seront entraînés peuvent être facilement quantifiées, par contre il est très difficile de quantifier les conditions critiques pour les sédiments maintenus assemblés par des forces de cohésion. Les forces de cohésion jouent un rôle essentiel dans la détermination de la possibilité de transport ou de la résistance à l'entraînement des matériaux fins déposés. La capacité de transport critique du courant, qui est nécessaire pour entraîner les sédiments consolidés, ainsi que celle qui est nécessaire pour maintenir les particules en suspension, peuvent s'exprimer en termes de $(g R S_f)^{1/2}$, prenant le nom de vitesse de cisaillement. La valeur de $(g R S_f)^{1/2}$ pour les matériaux non cohérents consolidés sera doublée ou triplée pour s'assurer que l'entraînement des sédiments consolidés et/ou cohérents aura bien lieu (Rooseboom et Mulke, 1982). Dans les modèles mathématiques de retenues avec charges importantes en matériaux fins (argile et silt), les valeurs critiques pour le dépôt et le seuil d'érosion sont généralement de 0,5 - 1,0 N/m² et 5 - 10 N/m² respectivement (Mahmood,

For turbulent boundary layers, generally found in reservoirs, whilst

$$\frac{\sqrt{gDS_t}}{\nu} \cdot d_{50} > 13$$

then sediment transport will take place while

$$\frac{\sqrt{gDS_t}}{v_{ss}} > 0.12$$

and if

$$\frac{\sqrt{gDS_t}}{\nu} \cdot d_{50} < 13 \quad (\text{laminar boundary conditions})$$

sediment transport of loose particles will take place if

$$\frac{\sqrt{gDS_t}}{v_{ss}} = \frac{1,6}{\frac{\sqrt{gDS_t} \cdot d_{50}}{\nu}}$$

with

g : acceleration of gravity

D : depth of flow

S_t : energy slope = $\frac{v^2}{C_h^2 R}$ (*Chezy*) or $\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}$ (*Manning*)

ν : kinematic viscosity of the fluid = 10^{-6} m²/s for water for practical purpose

d_{50} : median particle size of sediments

v_{ss} : settling velocity of particles to be removed

Whereas the conditions under which cohesionless material will be entrained can readily be quantified, it is quite difficult to quantify critical conditions for sediment held together by cohesive forces. Cohesive forces play a dominant role in determining the transportability or resistance to entrainment of deposited fine sediments. The critical stream transporting capacity which is required to remove consolidated sediment as well as that which is required to keep discrete particles in suspension can be expressed in terms of $(g R S_t)^{1/2}$, the so-called shear velocity. The value of $(g R S_t)^{1/2}$ for consolidated, non-cohesive materials should be doubled or trebled to ensure that scour will take place in consolidated and/or cohesive sediments (*Rooseboom and Mulke*, 1982). In mathematical modelling of reservoirs with significant fine material load (clay and silt), critical values for deposition and threshold of erosion are generally defined, with typical values of 0.5-1.0 N/m² and 5-10 N/m² respectively (*Mahmood*, 1987). The critical shear stress for erosion increases with age and consolidation of the sediment. In a recent study critical

1987). La contrainte de cisaillement critique pour l'érosion augmente avec l'âge et la consolidation des sédiments. Dans une récente étude portant sur les conditions critiques pour une érosion de masse dans des sédiments cohérents consolidés, on indique une contrainte de cisaillement critique atteignant 80 N/m^2 (Basson, 1996).

Les conditions requises pour que la chasse crée un trou d'érosion localisé en vue de maintenir les prises d'eau d'une centrale hydroélectriques dégagées de tous sédiments ont été établies au moyen de formules empiriques (Lu, 1991). Ces relations indiquent que le volume de cette zone d'érosion localisée est essentiellement défini par le niveau et le débit de l'évacuateur de fond. Le niveau, le nombre d'évacuateurs et leur espacement peuvent être déterminés au moyen de ces formules.

4.1.4. Exemples

– Les **retenues Jiaojia zhuang, Chine**, comprennent deux barrages dont l'exploitation est associée pour la maîtrise de l'alluvionnement (Zhang et al., 1976). La retenue supérieure est exploitée pour stocker seulement les apports avec faible teneur en sédiments, tandis que la retenue inférieure capte la plus grande partie des sédiments. Il est procédé de temps en temps à des lâchures d'eau de la retenue supérieure pour chasser les sédiments de la retenue inférieure.

– **Retenue Santo Domingo, Venezuela** (Krumdieck et Chamot, 1979). La première chasse dans la retenue Santo Domingo fut effectuée en 1978, soit quatre ans après l'achèvement du barrage. La retenue d'une capacité de 2,6 millions de m^3 est étroite, avec une pente raide du lit initial de 4 à 6 %; 3 évacuateurs de fond d'une capacité de $170 \text{ m}^3/\text{s}$ sous la cote de retenue normale ont été installés. Au cours d'une période de chasse de 3 semaines, $620\,000 \text{ m}^3$ de sédiments ont été évacués sur les $775\,000 \text{ m}^3$ estimés, dont 50 à 60 % furent chassés au cours des 4 premiers jours de chasse. Bien que les conditions fussent défavorables pour la chasse en raison de faibles apports d'eau (8 à $10 \text{ m}^3/\text{s}$), l'opération fut une réussite.

Après 4 jours de chasse, les évacuateurs de fond étaient presque complètement recouverts de sédiments, mais au moyen de chasses sous pression les sédiments purent être enlevés. Deux bulldozers furent également utilisés pour déplacer les dépôts vers le lit mineur. La perte de production d'énergie résultant des chasses fut estimée à 1,8 % de la production annuelle moyenne, la perte d'eau étant de 8,8 millions de m^3 .

Pour les chasses ultérieures, il fut recommandé de faire fonctionner les évacuateurs de fond à écoulement libre et dans des conditions d'apports d'eau élevés, avec une durée de chasse de 48 à 72 heures, à répéter annuellement lors de la saison des crues. Des chasses sous pression seront effectuées pendant moins de 10 minutes pour nettoyer les évacuateurs de fond et la chasse sera appliquée lorsque le delta de sédiments n'est pas situé à moins de 100 - 200 m du barrage.

– La **retenue Gen-Shan Pei, Taiwan** (Chian, 1986; Hwang, 1985) a une capacité portée à $7,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1943. En 1955, une galerie de chasse des sédiments, d'une capacité de $9,28 \text{ m}^3/\text{s}$, fut construite. Depuis 1955, les chasses avec baisse du plan d'eau ont évacué 8,5 millions de m^3 , maintenant ainsi un équilibre d'alluvionnement dans la retenue. La durée moyenne de chasse est de 53 jours par an, entre mai et août, les teneurs en sédiments chassés atteignant 8,94 %.

conditions for mass erosion in consolidated cohesive sediments, indicated a critical shear stress as high as 80 N/m² (Basson, 1996).

Flushing requirements to create a local scour hole to keep hydro power intakes clear of sediment have been established by empirical relationships (Lu, 1991). These relationships show that the volume of the local scour zone is mainly determined by the elevation of and discharge from the bottom outlet. The elevation, number of outlets and spacing of outlets can be determined by means of these relationships.

4.1.4. Case studies

– The **Jiaojia zhuang Reservoirs, China** include two dams operated as a system to control sedimentation (Zhang *et al.*, 1976). The upper reservoir is operated to impound only inflows with low sediment content, while the lower reservoir traps most of the sediment. Water releases from the upper reservoir have been used to flush sediments from the lower reservoir from time to time.

– The **Santo Domingo Reservoir, Venezuela** (Krumdieck and Chamot, 1979). The first flushing of the Santo Domingo Reservoir was carried out in 1978, four years after completion of the dam. The reservoir of 2.6 million m³ is narrow, with a steep original bed slope of 4% to 6%, and 3 bottom outlets with a capacity of 170 m³/s at normal reservoir level, were installed. During a period of 3 weeks of flushing 620 000 m³ of sediment was removed of the estimated 775 000 m³, of which 50% to 60% was flushed during the first 4 days of operation. Although the conditions were unfavourable for flushing due to low inflows, 8 to 10 m³/s, the operation was highly successful.

After 4 days of flushing, the bottom outlets were almost completely covered by sediment, but by sluicing under pressure the sediment could be removed. Two bulldozers were also used to move deposits towards the main stream. The estimated loss of power generation due to flushing was 1.8% of the annual average output, while the loss of water was 8.8 million m³.

Recommendations for further flushings were to operate the outlets under free outflow and high inflow conditions with a duration of flushing of 48 to 72 hours, to be repeated annually during the flood season. Flushing under pressure should be carried out to clear the outlets for durations less than 10 minutes and the flushing should be applied when the sediment delta is not less than 100 m - 200 m from the dam.

– **Gen-Shan Pei Reservoir, Taiwan** (Chian, 1986; Hwang, 1985) had a raised (1943) capacity of 7.7 million m³. In 1955 a sediment desilting tunnel was constructed with a capacity of 9.28 m³/s. Since 1955 drawdown flushing has removed 8.5 million m³ thereby maintaining sedimentation equilibrium in the reservoir. The average period of flushing is 53 days per year from May to August with flushed sediment concentrations being as high as 8.94%.

– Dans un système de **retenues en cascade**, la gestion de l'alluvionnement doit porter sur l'ensemble des retenues. Un système de 5 aménagements hydroélectriques projetés sur le Rhin a fait l'objet d'une étude sur modèle numérique (*Zarn, 1992*). En général, une grande retenue située à l'extrémité amont de la cascade d'aménagements est nécessaire pour limiter l'alluvionnement à l'aval. L'expérience acquise en Russie montre que la chasse sur une chaîne de retenues doit commencer sur la retenue aval pour former un chenal dans les dépôts qui servira à acheminer les sédiments chassés des retenues amont (*Kereselidze et al., 1985*).

D'autres exemples concernent la retenue Sefid Rud, Iran (*Amini et Fouladi, 1985; Parhami, 1986; Karvigh, 1991*), la retenue Sanmenxia, Chine (*Delft Hydraulics, 1992; Bruk, 1985*), les retenues Guanting, Heisonglin, Hengshan, Chine, (*Delft Hydraulics, 1992*), les retenues Germantown, Englewood, Naodehai, Guang, Ouchi-Kurgan, Khashm El Girba, Shuicaozi, Hengshan (*Bruk, 1985*), Guernsey, Warsak et Sefid-Rud (*Mahmood, 1987*).

4.2. EXCAVATION DES SÉDIMENTS

4.2.1. Généralités

L'excavation dans l'eau, ou dragage, est utilisée pour récupérer une capacité de stockage perdue dans de petites retenues subissant un alluvionnement, ainsi que pour d'autres applications localisées, telles que le nettoyage de prises d'eau obstruées. Les méthodes mécaniques classiques d'excavation à sec sont généralement plus coûteuses que le dragage et sont utilisées le long des tronçons supérieurs de la retenue. En général, le dragage est un moyen coûteux de reconstituer une capacité de stockage et ne sera retenu que si d'autres méthodes de maîtrise sont impossibles à mettre en œuvre, comme c'est souvent le cas dans les régions semi-arides (*Bruk, 1985; Mahmood, 1987; Basson et Rooseboom, 1997*).

Les problèmes environnementaux et socio-économiques associés à la construction de nouveaux barrages, ainsi que le nombre limité de nouveaux sites favorables, conduisent à une augmentation des coûts de réalisation de nouvelles retenues de stockage. Au cours de ces dernières années, des progrès techniques dans l'industrie des dragages ont entraîné une baisse des coûts unitaires, ce qui rend le dragage plus compétitif que dans le passé pour la maîtrise de l'alluvionnement.

4.2.2. Dragage des retenues - Conditions aux limites

Toute opération de dragage comprend trois composantes principales : l'excavation, le transport et l'utilisation des sédiments dragués. Le choix du matériel de dragage pour chacune de ces opérations est tout à fait spécifique.

Les conditions aux limites qui déterminent le type de matériel, le mode opératoire, le rendement et finalement les coûts sont les suivantes :

(i) Caractéristiques des sédiments

– Propriétés géotechniques des matériaux. Les argiles et silts rencontrés dans les retenues ont généralement des masses volumiques élevées : 1 300 à 1 700 kg/m³,

– In a **cascade system** of reservoirs, management of sedimentation of the series of reservoirs is required. A proposed scheme of 5 hydro power-stations on the Rhine River has been evaluated by means of a numeric model (*Zarn, 1992*). Generally a large-sized reservoir at the upper end of the cascade is required to limit downstream sedimentation. Experience gained in Russia indicates that flushing of a chain of reservoirs should start at the downstream reservoir to form a channel in the deposits which could be used to convey sediment flushed from upstream reservoirs (*Kereselidze et al., 1985*).

Other examples are Sefid Rud Reservoir, Iran (*Amini and Fouladi, 1985; Parhami, 1986; Karvigh, 1991*), Sanmenxia Reservoir, China (*Delft Hydraulics, 1992; Bruk, 1985*) Guanting, Heisonglin, Hengshan Reservoirs, China (*Delft Hydraulics, 1992*), Germantown, Englewood, Naodehai, Guang, Ouchi-Kurgan, Khashm El Girba, Shuicaozi, Hengshan, (*Bruk, 1985*), Guernsey, Warsak and Sefid-Rud Reservoirs (*Mahmood, 1987*).

4.2. EXCAVATION OF SEDIMENT

4.2.1. General

Excavation in the wet, or dredging, is being used worldwide to recover lost storage due to sedimentation in small reservoirs, as well as for localized applications such as clearing of intakes. Conventional dry mechanical methods of excavation are generally more expensive than dredging, but are used in reservoirs along their upper reaches. Generally dredging is an expensive means of restoring storage capacity and should only be considered if the use of alternative control strategies are not possible as is often the case in semi-arid regions (*Bruk, 1985; Mahmood, 1987; Basson and Rooseboom, 1997*).

The environmental and socio-economic concerns when constructing new dams with limited suitable new dams sites, are causing costs of creating new storage to rise. Technical developments in the dredging industry have lowered unit costs in recent years, making dredging a more viable tool to control sedimentation than before.

4.2.2. Reservoir dredging boundary conditions

Any dredging operation consists of three main components: excavation, transportation and disposal of the sediment. Selection of suitable dredging equipment for each of these is highly project specific.

The boundary conditions which determine the type of equipment, method of operation, production and ultimately the costs, are:

(i) Sediment characteristics

– Geotechnical properties of the material. Clay and silt encountered in reservoirs normally have relatively high densities: 1 300 to 1 700 kg/m³, with

avec des cohésions supérieures à 10 kPa. Ni l'aspiration hydraulique ni le jet d'eau n'offrent la possibilité de disloquer des sédiments cohérents consolidés. L'expérience a montré que les sédiments devaient être désintégrés mécaniquement avec le transport hydraulique.

- Le volume total des sédiments à draguer a une forte influence sur le coût unitaire du dragage.

- Géométrie et emplacement des sédiments : épaisseur de la couche. Le dragage dans des conditions de faible disponibilité de sédiments conduit à des coûts élevés du fait que l'engin de dragage doit être souvent déplacé.

- Quantité et nature des détritiques : arbres, matériaux de construction et autres détritiques.

- Présence de matériaux dangereux pour le personnel et le matériel.

(ii) Conditions hydrauliques et hydrologiques

- L'eau nécessaire pour la production d'énergie hydraulique et l'irrigation peut être réduite par les opérations de dragage. La perte d'eau des retenues dans les régions semi-arides, résultant du dragage, revêt une grande importance. Le rapport sédiments/eau dans les opérations de dragage classique étant généralement de l'ordre de 1 : 4, le dragage et le traitement des matériaux dragués à l'aval de la retenue peuvent causer d'importantes pertes d'eau. Dans certains cas, le problème est résolu de la façon suivante :

- (a) L'eau déchargée est utilisée pour l'irrigation par les agriculteurs riverains, comme faisant partie des lâchers normaux d'eau d'irrigation.

- (b) Les sédiments ne doivent pas être déchargés à l'aval mais peuvent être retenus derrière des digues autour de la retenue, de l'eau propre retournant à la retenue.

- (c) De nouveaux progrès dans les opérations de dragage réduisent le volume d'eau nécessaire au dragage (*Rosenbrand, 1991*).

- Les conditions de crue peuvent limiter le dragage à la saison sèche uniquement.

- Les niveaux d'eau peuvent varier suivant l'exploitation de la retenue et la variation des apports d'eau.

- Profondeur de dragage. Le matériel classique de dragage ne peut être utilisé que jusqu'à des profondeurs de 30 m.

- Charge d'eau disponible pour un dragage par siphonage.

(iii) Conditions météorologiques

- Pluie, température, humidité, vent et visibilité.

(iv) Caractéristiques générales du site

- Accessibilité de la retenue : limitations sur la charge et les dimensions pour les engins de transport routier.

- Disponibilité de main d'œuvre et de matériel.

- Restrictions dans les opérations : opérations de nuit.

- Disponibilité d'énergie électrique. L'utilisation d'énergie électrique au lieu de diesel classique peut réduire les coûts de plus de moitié. L'énergie électrique est

cohesion higher than 10 kPa. Neither plain hydraulic suction nor jetting offers a feasible means of dislodging consolidated cohesive sediment. Experience has shown that the sediment has to be mechanically disintegrated before hydraulic transport can take place:

- Total volume of sediment to be dredged has a major influence on unit dredging costs.
- Geometry and location of sediment: layer thickness. Dredging under conditions of poor availability will lead to high dredging costs because the dredger needs to be moved often.
- Quantity and nature of impurities: trees, construction and other debris.
- Presence of hazardous materials for staff and equipment.

(ii) Hydraulic and hydrological conditions

- Water required for hydro power or irrigation may be limiting on dredging. The loss of water from reservoirs in semi-arid areas due to dredging is of major concern. Since the sediment-water ratio of conventional dredging methods is normally in the order of 1 : 4, dredging and disposal downstream of the reservoir could cause severe water losses. The problem is in some cases solved by way of the following :

(a) Discharged water is used by riparian irrigators as part of the normal irrigation release.

(b) Sediment disposal does not have to take place downstream but can be contained behind dykes around the reservoir, with clean water returning to the reservoir.

(c) New dredging development reduces the volume of make-up water required for the dredging process (*Rosenbrand, 1991*).

- Flood conditions could limit dredging to only the dry season.
- Water levels could be variable due to reservoir operation and variable inflow.
- Depth of dredging. Conventional dredging equipment can only be used up to depths of 30 m.
- Available hydraulic head for siphon dredging.

(iii) Meteorological conditions

- Rainfall, temperature, humidity, wind and visibility.

(iv) General site characteristics

- Accessibility of reservoir: limitations on weight and dimensions for road transport vehicles.
- Availability of labour and materials.
- Operational restrictions: night operation.
- Availability of electric power. The use of electric power instead of the conventional diesel power can cut costs by more than half. Electric power is

généralement fournie par des lignes aériennes le long des rives, un câble flottant alimentant l'engin de dragage.

(v) **Conditions environnementales**

- Restrictions sur la turbidité.
- Restrictions sur le transport et la mise en dépôt des matériaux dragués.

(vi) Les sédiments dragués sont généralement transportés au moyen de conduites flottantes souples en polyéthylène à haute densité ou en acier, ayant des diamètres de 0,3 à 0,8 m. Des longueurs de conduite de 2 à 4 km ont été utilisées pour le dragage de retenues avec des stations relais de pompage le long de la conduite pour maintenir des gradients de charge suffisants. Les vitesses d'écoulement dans la conduite sont de l'ordre de 3 à 5 m/s pour limiter le risque d'obstruction.

Le plus souvent les conditions d'exploitation de la retenue éliminent l'utilisation des systèmes de transporteur à bande ou à câble. Le transport par barge est une méthode classique bien connue et a été utilisé avec succès en association avec le matériel mécanique de dragage, en particulier pour le dragage des sédiments grossiers le long des tronçons supérieurs d'un réservoir. La double manutention des sédiments dragués et le faible rendement conduisent toutefois à des coûts unitaires élevés.

(vii) **Déchargement des sédiments dragués**

- La zone située immédiatement à l'aval du barrage constitue une solution attrayante, mais de fortes teneurs en sédiments peuvent poser des problèmes environnementaux si des précautions ne sont pas prises. Dans certains pays, la teneur maximale admissible le long de la rivière à l'aval est limitée par la législation; par exemple, en Suisse, la teneur limite est de 4 % en volume (*Pralong, 1986*).

- À l'intérieur de la tranche morte de la retenue. De nombreuses retenues ont des tranches mortes au-dessous du seuil de la vidange la plus basse, prévues pour l'alluvionnement, ou pouvant être utilisées pour la mise en dépôt des sédiments excavés dans la tranche vidangeable.

- Près de la cuvette de la retenue. La mise en dépôt derrière des digues constitue un des moyens les plus acceptables de décharge. Des volumes suffisants de stockage doivent être prévus pour tenir compte du foisonnement initial des sédiments excavés (2 à 3 fois le volume in situ avant excavation) et pour permettre un temps de séchage.

- Zones à l'aval du barrage. On peut se débarrasser des sédiments en les stockant dans des enceintes situées à l'aval du barrage.

- Déchargement en dehors du site. *Roovers (1989)* a proposé un système d'hydrocyclones et un procédé par ceinture filtrante pour un assèchement rapide des sédiments lorsque ceux-ci sont déchargés par camion.

4.2.3. Choix du matériel de dragage

Le matériel de dragage classique peut être classé dans les catégories mécanique et hydraulique, des techniques spéciales, telles que le dragage par agitation, le siphonage et le dragage profond (pompes pneumatiques) étant également disponibles (*Sheng, 1983; 1988; Roovers, 1989*).

normally supplied by overhead lines along the bank, with a floating cable to the dredger.

(v) **Environmental conditions**

- Restriction on turbidity.
- Restrictions on dredged material transport and placement.

(vi) Transportation of dredged sediment is usually via flexible floating HDPE or steel pipelines, with diameters from 0.3 m to 0.8 m. Pipeline lengths of 2 to 4 km have been used in reservoir dredging with booster pump-stations along the pipeline to maintain sufficient energy gradients. The design velocities for the discharge pipeline are in the order of 3 to 5 m/s, to limit possible blockages.

In most cases reservoir conditions rule out the use of floating conveyor belts or cable conveyor systems. Barge transportation is a well-known traditional method and has been used successfully together with mechanical dredging equipment, especially when dredging coarse sediment along the upper reaches of a reservoir. Double handling of the dredged sediment and low production rates tend to lead to high unit costs however.

(vii) **Disposal of dredged sediment**

- The area directly downstream of the dam provides an attractive option, but high sediment concentrations could cause environmental concern if not properly managed. In certain countries the maximum allowable induced concentration along the river downstream is limited by legislation, for example in Switzerland the concentration limit is 4% by volume (*Pralong, 1986*).

- Within the dead storage zone. Many reservoirs have dead storage zones created for sedimentation disposal as a result of minimum outlet levels, or which could be utilized for disposal of sediment excavated in the live storage zones.

- Next to the reservoir basin. Disposal behind dykes forms one of the most acceptable ways of disposal. Suitable storage volumes for disposal have to be provided to cater for initial bulking of excavated sediment 2 to 3 times the eventual in situ volume and to allow for drying time.

- Areas downstream of the dam. Sediment could be disposed of in contained areas downstream of the dam.

- Off-site disposal. *Roovers* (1989) has proposed a system of hydro cyclones and a belt filter process for quick dewatering of sediment when disposal is by truck.

4.2.3. Selection of dredging equipment

Conventional dredging equipment can be categorized as mechanical and hydraulic dredgers, while specialized techniques such as agitation dredging, siphoning and deep dredging systems such as pneumatic and air lift pumps are also available (*Sheng, 1983; Roovers, 1989*).

Bien que chaque situation ait ses propres conditions aux limites, il est généralement admis que pour le dragage de retenues sur des profondeurs inférieures à 30 m, comportant en particulier de l'argile consolidée, la drague avec désagrégation-succion ou la drague avec roue à augets sera utilisée pour les travaux de dragage en grande masse. Pour des profondeurs plus grandes, la drague à benne preneuse ou les systèmes de pompage avec fluidification peuvent être utilisés pour des dragages localisés. Dans des conditions appropriées, le dragage par siphonage, avec un appareil de désagrégation sera également une solution peu coûteuse.

4.2.4. Considérations générales relatives au dragage des retenues

Le dragage de tous les sédiments déposés dans une retenue n'est pas nécessaire et le volume devant être extrait est déterminé par la demande en eau, le volume d'écoulement, les caractéristiques de la cuvette de la retenue, le volume de sédiments, etc. Le dragage doit créer un volume profond dans les sédiments jusqu'au niveau du lit initial, ce qui limitera les pertes par évaporation au cours des périodes hydrologiques critiques. Pour obtenir les mêmes avantages, un volume beaucoup plus petit doit être dragué comparativement à la capacité supplémentaire de stockage créée par la surélévation d'un barrage (*Basson et Rooseboom, 1997*).

Lorsque les sédiments sont relativement grossiers, des barrages de captage situés sur les tronçons supérieurs de la retenue limiteront l'alluvionnement de la retenue. L'enlèvement mécanique régulier des sédiments grossiers en vue de leur utilisation comme granulats de béton constitue un système acceptable (*JANCOLD, 1997*).

L'utilisation bénéfique des sédiments dragués a fait l'objet de nombreuses études. La mise en valeur des terres, l'utilisation dans l'agriculture, la fabrication de briques et l'utilisation comme granulats dans la construction sont quelques-unes des utilisations possibles pour baisser les coûts du dragage (*Nose, 1982; Okada et al., 1982; Shiozawa, 1974; Dai, 1980*). Cependant, dans la plupart des cas, le coût élevé du transport est le facteur limitatif.

4.2.5. Exemples

Le dragage est une opération courante dans de nombreuses retenues à travers le monde (*Delft Hydraulics, 1992*). Quatre exemples sont examinés ci-après : dragage au moyen de matériel hydraulique classique, dragage par siphonage, dragage profond et dragage associé à des chasses.

– Le cas de la **retenue Mkinkomo**, Swaziland (*Friede, 1994; Haskoning, 1988; Delft Hydraulics, 1992*) illustre la capacité d'une opération de dragage pour rétablir le volume de retenue perdu. L'alluvionnement avait réduit la capacité initiale de la retenue de 3,2 millions de m³ à environ 0,8 millions de m³ entre 1963 et 1987, et conduit à une usure excessive des turbines de l'usine hydroélectrique. Une étude de faisabilité indiqua qu'une drague à désagrégation et succion pouvait être utilisée pour enlever 2,5 millions de m³ de sédiments, avec transport au moyen d'une conduite flottante et d'une conduite installée sur la rive, les sédiments dragués étant mis en dépôt dans des enceintes à l'aval du barrage.

Although each project has its own unique boundary conditions, it is generally accepted that for reservoir dredging in depths of less than 30 m, especially with consolidated clay, the cutter-suction or bucket-wheel dredgers should be utilized for large-scale bulk dredging projects. At greater depths the grab dredger or specialized fluidization pumping systems could be used for localized dredging. Under suitable conditions siphon dredging with a cutter will also provide a cheap dredging solution.

4.2.4. General considerations of reservoir dredging

Dredging of all the sediment in a reservoir is not necessary and the required volume is determined by the water demand, run-off, reservoir basin characteristics, volume of sediment, etc. Storage dredging should create a deep capacity in the sediment down to the original bed level which will limit evaporative losses during critical hydrological periods. To obtain the same yield benefit, a much smaller volume needs to be dredged compared with the additional storage capacity created by raising a dam (*Basson and Rooseboom, 1997*).

When sediments are relatively coarse, check dams placed at upper reaches in the reservoir, will limit reservoir sedimentation. With regular mechanical removal of the coarse sediments to be used as concrete aggregates, it is possible to achieve a sustainable system (*JANCOLD, 1997*).

Beneficial use of dredged sediment has been evaluated extensively. Land reclamation, agricultural use, brick manufacturing and use as aggregates in the construction industry are some of the potential uses to lower the dredging costs (*Nose, 1982; Okada et al., 1982; Shiozawa, 1974; Dai, 1980*). In most situations however, high transportation cost is the limiting factor.

4.2.5. Case studies

Dredging is being carried out routinely in many reservoirs all over the world. (*Delft Hydraulics, 1992*). Four examples are discussed, covering storage dredging by conventional hydraulic and siphoning equipment, deep dredging and dredging in combination with flushing operation.

– The case of **Mkinkomo Reservoir, Swaziland** (*Friede, 1994; Haskoning, 1988; Delft Hydraulics, 1992*) illustrates the scope of a dredging project to restore lost reservoir capacity. Sedimentation reduced the original capacity of 3.2 million m³ to about 0.8 million m³ between 1963 and 1987, and led to excessive wear of the turbines of the hydro power-station. A feasibility study indicated that a cutter-suction dredger could be used to remove 2.5 million m³ sediment, with transportation via a floating and a shore-based pipeline and then placing the dredged material in confined disposal basins downstream of the dam.

- Le dragage à une échelle réduite a été exécuté depuis 1993, les premiers 250 000 m³ de sédiments ayant été mis en dépôt directement à l'aval du barrage. Malgré la chasse de la plus grande partie des sédiments au cours des périodes de forts débits, des problèmes environnementaux poussèrent le maître d'ouvrage à mettre en dépôt les sédiments de préférence près du réservoir dans une zone destinée à recevoir des installations industrielles dans le futur. Un total de 1,050 millions de m³ nécessitent un dragage par la méthode de désagrégation-succion. Le rendement est de 180-200 m³/heure pour une opération de 24 heures/jour; la profondeur maximale de dragage est de 8 m, une conduite flottante de 320 m de longueur et de 300 mm de diamètre étant utilisée. L'utilisation de l'énergie électrique conduit à des économies importantes de coût. Le coût de mise en dépôt représente 20 % du coût total du dragage de 1,77 US dollar/m³.

- À la **retenue Tianjiawan**, située dans une région semi-aride du nord de la Chine (capacité initiale de 9,42 millions de m³), un dragage par siphonage est utilisé : il s'agit d'une barge constituée de six flotteurs en acier, une conduite flottante de 550 mm de diamètre et de 229 m de longueur étant reliée à l'évacuateur du barrage (*Dai*, 1980). Ce matériel de dragage fut installé en 1975, après que la retenue eût perdu 40 % de sa capacité par suite de l'alluvionnement et d'une pénurie d'eau de chasse. Les sédiments déposés sont fins (0,006 mm à 0,008 mm), la plupart des dépôts se trouvant près du barrage, situation idéale pour un dragage par siphonage.

Au cours de l'année 1977, le volume d'écoulement annuel et le transport solide annuel ont été respectivement de 4,16 millions de m³ et de 298 000 m³; l'eau utilisée pour le siphonage a atteint 2,05 millions de m³ et 320 000 m³ de sédiments furent dragués. Une concentration moyenne de 190 kg/m³ fut obtenue au cours des 695 heures d'opération, avec un rapport sédiment/eau de 15,6 % en volume. Toute l'eau et tous les sédiments évacués furent utilisés pour l'irrigation. Le rendement a été de 460 m³/heure, à un coût moyen unitaire de 0,045 yuan/m³ (0,005 US dollar/m³). La charge hydraulique totale est de 17,4 m, mais la charge effective est seulement de 7,9 m. Une tête de succion en forme de pelle à poussière fut utilisée au début, mais un désagrégateur rotatif fut installé plus tard.

- Un dragage profond localisé a été exécuté aux prises d'eau du **barrage Roseires** (Soudan) pour empêcher les sédiments et les détritiques de pénétrer dans les prises. Chaque année, de novembre à juillet, lorsque les vitesses du courant permettent de travailler avec du matériel flottant, des dragues à benne preneuse ont été utilisées. L'expérience acquise au barrage Roseires a montré que le simple maintien des pertuis d'entrée ouverts pouvait être une tâche majeure, conduisant à un coût unitaire élevé de dragage. De toute façon, l'absence de dragage conduirait à la perte des fonctions du barrage (*Demas*, 1991).

- Le dragage associé à des chasses à la **retenue Chiryurt** (Russie) montre qu'une combinaison des techniques de maîtrise de l'alluvionnement des retenues peut être utilisée dans certaines situations spécifiques, en particulier pour enlever les dépôts sur rives (*Vorobev et al.*, 1989). Pour améliorer l'efficacité des chasses, un chenal de 180 m de longueur, curviligne en plan, de 3,5 m de profondeur et d'un volume de 25 000 m³ fut creusé par dragage. Au cours des deux séries de chasse, un total de 941 000 m³ furent enlevés de la retenue, l'érosion des rives se produisant le long du chenal dragué.

– Dredging on a scaled-down level has been carried out since 1993 with the first 250 000 m³ of sediment being disposed directly downstream of the dam. Although most of the sediment was washed away during high flows, environmental concern prompted the dam owner rather to dispose the sediments next to the reservoir in an area to be utilized for industrial development in future. A total of 1.050 million m³ sediment needs to be dredged with the cutter-suction dredger. The production rate is 180 to 200 m³/hour with 24-hour/day operation, the maximum dredging depth is 8 m, and a 320 m floating pipeline of 300 mm diameter is being used. Utilisation of electric power results in significant cost savings. Disposal costs makes up 20 % of the total dredging cost of 1.77 USD/m³.

– In the **Tianjiawan Reservoir**, in the semi-arid region of northern China, (original capacity 9.42 million m³), a siphon dredger is used consisting of a barge made up of six steel floats and a floating pipeline 229 m in length and 550 mm in diameter, connected to the dam outlet (*Dai*, 1980). The siphon dredger was installed in 1975 after the reservoir had lost 40 % of its storage capacity due to sedimentation and a lack of flushing water. The sediment deposits are fine (0.006 mm to 0.008 mm), with most of the deposits close to the dam, an ideal condition for siphon dredging.

During 1977 the annual run-off and sediment load were 4.16 million m³ and 298 000 m³ respectively, while water used for siphoning amounted to 2.05 million m³ and 320 000 m³ sediment was dredged. An average concentration of 190 kg/m³ was obtained during 695 hours of operation with a sediment-water ratio of 15.6 % by volume. All water and sediment released was used for irrigation. The production rate was 460 m³/hour at an average unit cost of 0.045 yuan/m³ (0.005 USD/m³). The total hydraulic head is 17.4 m, but the effective head is only 7.9 m. A suction head of dustpan shape was first used, but a rotating cutter was later attached.

– Localized deep dredging has been carried out at the intakes of **Roseires Dam**, Sudan, to prevent sediment and debris from entering the intakes. Every year, from November to July, when current velocities permit working with floating equipment, clam shell dredgers have been used. The dredging experience at Roseires Dam indicated that merely keeping the inlets open can be a major task, resulting in high unit dredging cost. No dredging would however result in the loss of the dam's function (*Demas*, 1991).

– The combined dredging and flushing operation at **Chiryurt Reservoir**, Russia, indicates that a combination of reservoir sedimentation control techniques could be used under specific conditions, especially to remove overbank deposits (*Vorobev et al.*, 1989). To improve the effectiveness of flushing, a channel 180 m in length, curvilinear in plan, 3.5 m deep with a volume of 25 000 m³ was dredged. During two flushing sequences a total of 941 000 m³ sediment was scoured from the reservoir, with bank erosion occurring along the dredged channel.

5. MESURES DESTINÉES À COMPENSER L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES

Bien que cela ne constitue pas une solution à long terme du problème d'alluvionnement, une retenue est souvent conçue avec une capacité suffisamment grande pour s'accomoder de l'alluvionnement, ou bien le barrage est surélevé ou de nouveaux barrages sont construits lorsque la capacité restante devient trop petite pour satisfaire à la demande en eau.

5.1. SURÉLÉVATION DU BARRAGE

La surélévation d'un barrage est l'une des solutions permettant de compenser la perte de capacité d'une retenue due à l'alluvionnement, et a souvent été considérée comme la solution logique pour faire face à l'alluvionnement, spécialement dans les régions arides. Bien qu'une telle solution puisse être économiquement acceptable dans le court terme, la surélévation d'un barrage ne constitue pas une solution à long terme du problème d'alluvionnement.

Les problèmes posés par la surélévation d'un barrage sont les suivants :

- questions politiques et socio-économiques concernant le relogement des populations
- augmentation des pertes d'eau par évaporation et percolation
- problèmes de sécurité de barrage pouvant conduire à des coûts élevés de surélévation
- impacts sur l'utilisation des terres.

Le Bulletin CIGB n° 64 (1988) donne des exemples de surélévation de barrages.

5.2. CONSTRUCTION DE NOUVEAUX BARRAGES

La construction de nouveaux barrages pour résoudre le problème d'alluvionnement pose les mêmes problèmes que ceux indiqués ci-dessus, avec en plus le fait que les sites propices à la construction de barrages deviennent de plus en plus rares, ce qui conduit à des coûts élevés de construction.

5.3. CONCEPTION POUR TENIR COMPTE DE L'ALLUVIONNEMENT

Les effets économiques négatifs de l'alluvionnement peuvent être différés au delà de l'horizon économique effectif d'un aménagement de ressources en eau en surdimensionnant la retenue.

5. MEASURES TO COMPENSATE FOR RESERVOIR SEDIMENTATION

Although not offering a long-term solution to the sedimentation problem, a reservoir is often designed with a large enough capacity to accommodate sediment, or the dam is raised or new dams are constructed when the remaining capacity becomes too small to supply the water demand.

5.1. DAM RAISING

The raising of a dam is one of the alternatives for compensating for the loss of reservoir capacity due to sedimentation, and has often been seen as the logical approach to counter sedimentation, especially in arid regions. Although it might be cost-effective in the short-term, dam raising does not provide a long-term solution to the sedimentation problem.

Related problems with dam raising are:

- socio-economic and political issues related to resettling of people
- increased water losses due to evaporation and seepage
- dam safety aspects which could lead to high raising costs
- impacts to land use

Case studies can be found in ICOLD Bulletin 64 (1988).

5.2. CONSTRUCTION OF NEW DAMS

Construction of new dams to solve the sedimentation problem leads to the same problems as indicated above as well as the fact that suitable dam sites are becoming scarcer, resulting in high construction costs.

5.3. DESIGN FOR SEDIMENTATION

The negative economical effects of sedimentation can be postponed beyond the effective economic horizon of a water resources development by overdimensioning the reservoir.

À la retenue de Tarbela, après six ans d'exploitation, 44 % des sédiments s'étaient déposés dans la tranche vidangeable de retenue, alors que 78 % de la tranche morte était toujours disponible (*Mahmood, 1987*). Au barrage Gariep (Afrique du Sud), la retenue a perdu 10 % de sa capacité initiale en moins de 20 ans d'exploitation, avec 88 % des sédiments déposés dans la tranche vidangeable. Au Haut Barrage d'Assouan, les dépôts de sédiments atteignaient 2 km³ en 1986, dont 50 % étaient situés dans la tranche vidangeable, alors que la tranche morte a un volume de 31 km³.

Avec la présence d'évacuateurs profonds et des stratégies appropriées de maîtrise de l'alluvionnement, le surdimensionnement d'un barrage peut être limité et une capacité de retenue à long terme assurée.

5.4. TRANSFERT D'EAU DEPUIS DES BASSINS VERSANTS ADJACENTS

La régularisation de l'écoulement et les nécessités de maîtrise de l'alluvionnement dans une retenue sont souvent incompatibles, spécialement dans les zones semi-arides. Aussi le transfert d'eau depuis des bassins versants adjacents peut constituer une solution pour la maîtrise de l'alluvionnement dans une retenue existante, si le schéma est économiquement faisable et le bassin versant adjacent peut fournir un écoulement d'eau excédentaire suffisant.

At Tarbela Reservoir, after 6 years of operation, 44 % of the sediments were deposited within the live storage zone while 78 % of the dead storage was still available (*Mahmood*, 1987). At Gariep Dam, South Africa, the reservoir has lost 10 % of its original capacity in less than 20 years of operation, with 88 % of the sediment located within the live storage zone. At High Aswan Dam sediment deposits amounted to 2 km³ in 1986 of which 50 % was contained within the live storage zone compared with a dead storage volume of 31 km³.

With the provision of low outlets and suitable reservoir sedimentation control strategies, overdimensioning of a dam can be limited and a long-term capacity ensured.

5.4. AUGMENTATION FROM ADJACENT CATCHMENTS

Regulation of run-off and sedimentation control requirements in a reservoir often are in conflict, especially in semi- arid areas. Therefore, transfer of water from adjacent catchments can provide a solution to the sedimentation control in an existing reservoir if the scheme is economically feasible and the donor catchment can provide sufficient excess run-off.

6. ÉTUDE SUR MODÈLES DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES

L'alluvionnement des retenues peut être étudié en utilisant des méthodes statistiques (méthodes empiriques) et des modèles mathématiques et/ou physiques. Ces méthodes sont souvent appliquées simultanément.

6.1. RELATIONS EMPIRIQUES

Les méthodes empiriques sont relativement simples et donnent seulement des indications grossières des taux d'alluvionnement. Elles contiennent souvent des variables simplistes tandis que les effets d'autres variables importantes peuvent ne pas être pris en compte. Les relations empiriques sont déduites de données spécifiques recueillies in situ et ne seront donc pas applicables dans des conditions différentes de celles pour lesquelles les relations ont été établies.

Les relations empiriques ne peuvent pas prévoir le comportement à court terme, dans le temps, des retenues et, en particulier, ne conviennent pas pour la prévision du processus d'alluvionnement au cours de la vidange d'une retenue (*Mahmood, 1987*).

6.2. MODÈLES MATHÉMATIQUES

Les modèles mathématiques unidimensionnels d'alluvionnement de retenue, basés sur les équations de mouvement et de continuité de l'eau et des sédiments, ainsi que sur les équations de transport solide, sont largement utilisés et donnent de bons résultats. La plupart des modèles mathématiques sont basés sur l'application couplée ou séquentielle des équations unidimensionnelles de mouvement pour la phase « eau » et de l'équation de conservation de masse pour les sédiments (*Mahmood, 1987*).

Convenablement établis, étalonnés et vérifiés, les modèles mathématiques peuvent être utilisés avec confiance pour étudier les opérations de lâchure et de chasse des sédiments. Les données recueillies in situ servent souvent à étalonner les coefficients empiriques intervenant dans les modèles mathématiques et revêtent donc une grande importance dans les analyses. Ces modèles nécessitent souvent des compétences techniques spéciales dans le traitement des données de base et la conduite des calculs, et sont généralement appliqués aux études de grands et importants aménagements. Dans l'utilisation des modèles mathématiques, le plus important est cependant une parfaite compréhension des processus d'alluvionnement dans les retenues.

Divers modèles mathématiques de prévision du processus d'alluvionnement des retenues ont été recensés (*Han et al., 1973, 1990; Thomas et Prasuhn, 1977; Chollet*

6. RESERVOIR SEDIMENTATION MODELLING

Reservoir sedimentation can be analyzed by means of statistical analyses (empirical methods) and mathematical and/or physical modelling. These methods are often used simultaneously.

6.1. EMPIRICAL RELATIONSHIPS

The empirical methods are relatively simple and only give rough indications of sedimentation rates. They often contain simplistic variables whilst the impact of other significant variables may be neglected. Empirical relationships are derived from specific field data sets and should therefore not be applied under conditions differing from those for which the relationships were derived.

Empirical relationships cannot predict short-term time-dependent behaviour of reservoirs and are typically not suitable for predicting the sedimentation process during reservoir drawdown (*Mahmood, 1987*).

6.2. MATHEMATICAL MODELLING

One-dimensional mathematical modelling of reservoir sedimentation based on the equations of motion and continuity of water and sediment, together with sediment transport equations are widely used and give good results. Most mathematical models are based on coupled or sequential application of one-dimensional equations of motion for the water phase and the equation of mass conservation for the sediment (*Mahmood, 1987*).

Properly developed, calibrated and verified mathematical models can be used with confidence to analyse sediment sluicing and flushing operations. Field data is often used to calibrate empirical coefficients in mathematical models and they are therefore of great importance in analyses. These models often require special technical and data inputs and computational skills, and are usually applied in investigations of large/important projects. Most important in the use of mathematical models however, is an understanding of the sedimentation processes within reservoirs.

Various mathematical models to predict the process of reservoir sedimentation have been compiled (*Han et al, 1973, 1990; Thomas and Prasuhn, 1977; Chollet and*

et Cunge, 1980; Sanchez, 1982; Zhang et al., 1983; Pitt et Thompson, 1984; Holly et Rahuel, 1990; Yang, 1992; Vasiliev et al., 1993; Wang, 1993; Basson, 1996, etc.)

Le modèle HEC-6 est l'un des modèles les plus utilisés (Thomas et Prasuhn, 1977). Bien qu'il puisse prédire de façon tout à fait satisfaisante les processus d'alluvionnement à long terme lors d'opérations de stockage et dans des conditions de teneur en sédiments faible à modérée, le modèle (comme beaucoup d'autres) présente quelques imperfections importantes pour la simulation des opérations de lâchure et de chasse de sédiments avec baisse du plan d'eau, à savoir :

- le transport solide est supposé égal à la capacité de transport solide de chaque tronçon d'une retenue, ce qui n'est vrai que dans le cas où la capacité de transport solide varie graduellement

- les calculs des profils de surface d'eau et du transport solide sont effectués séparément, ce qui ne donnera des résultats précis que dans le cas où la valeur dépôt/érosion intervenant au cours d'un intervalle de calcul est petite, comme cela se présente lorsque les teneurs en sédiments sont faibles.

La modélisation mathématique au moyen d'équations de transport de sédiments dans des conditions de non-équilibre est nécessaire pour simuler les processus fluviaux dans les rivières fortement chargées en sédiments, caractérisés par une interaction intense entre la déformation du lit de la rivière et les écoulements dans le lit. Un tel modèle a été établi pour le Fleuve Jaune, Chine, à partir d'une grande quantité de données relevées sur la retenue Sanmenxia et d'autres retenues (Zhang et al., 1983).

Basée sur la théorie de la diffusion, l'expression du transport de sédiments dans ce modèle se présente comme suit :

$$q_t = q_s - e^{-\alpha w x} (q_{s0} - q_s)$$

avec

q_t : débit solide par unité de largeur à la sortie

q_s : capacité de transport solide par unité de largeur

q_{s0} : débit solide par unité de largeur à l'entrée

w : vitesse de décantation des particules dans l'eau tranquille

x : distance entre l'entrée et la sortie

q : débit par unité de largeur

α : constante obtenue dans la solution de l'équation de diffusion, mais habituellement traitée comme un coefficient empirique et déterminée à partir des données recueillies *in situ*.

Du fait de l'utilisation de relations empiriques basées sur des données recueillies *in situ*, leur application est limitée aux conditions pour lesquelles ces relations ont été étalonnées.

Plusieurs modèles utilisant des équations de transport solide, dans des conditions de non-équilibre et de non-uniformité, ont été établis et ont incorporé :

- les changements de granulométrie résultant du dépôt et de l'érosion,
- l'échange entre les particules en suspension et les matériaux du lit,

Cunge, 1980; Sanchez, 1982; Zhang *et al.*, 1983; Pitt and Thompson, 1984; Holly and Rahuel, 1990; Yang, 1992; Vasiliev *et al.*, 1993; Wang, 1993; Basson, 1996), etc.

The HEC-6 model is one of the most widely used models (Thomas and Prasuhn, 1977). Although it can predict long-term sedimentation processes under storage operation and low to moderate sediment concentration conditions quite well, the model (as many others) suffers from some major shortcomings for drawdown sluicing/flushing simulation namely :

- sediment transport is assumed to be equal to the sediment carrying capacity of each reach of a reservoir, which will only be true where sediment transport capacity varies gradually
- computations of water surface profiles and sediment transport are carried out separately which will only yield accurate results when deposition/scour which occurs during a calculation interval is small such as is the case where sediment concentrations are low

Mathematical modelling by means of equations of sediment transport under non-equilibrium conditions is required to simulate the fluvial processes in heavily sediment-laden rivers, characterized by intensive interaction between river-bed deformation and channel flows. Such a model has been developed for the Yellow River, China, based on a large amount of field data obtained from the Sanmenxia and other reservoirs (Zhang *et al.*, 1983).

Based on the theory of diffusion, the expression of sediment transport used in this model is :

$$q_t = q_{st} - e^{-\frac{\alpha x}{w}} (q_{so} - q_{st})$$

with

q_s : sediment discharge per unit width at the exit

q_{st} : sediment carrying capacity per unit width

q_{so} : sediment discharge per unit width at entrance

w : settling velocity of particles in still water

x : distance between entrance and exit

q : discharge per unit width

α : constant obtained in the solution of diffusion equation, but usually treated as an empirical coefficient and determined from field data

Because of the use of empirical relationships based on field data, their application is limited to those conditions for which these relationships were calibrated.

Several models using equations of sediment transport under non-equilibrium and non-uniform conditions have been developed and have incorporated :

- size distribution changes due to deposition and scouring
- interchange between suspended particles and bed material

– la concentration de sédiments non égale aux ajustements de capacité de transport solide dans l'espace et le temps.

Un tel modèle a été utilisé sur le Fleuve Yangtze, Chine (*Han et al.*, 1973, 1990; *Zhou*, 1993). De tels modèles fournissent des résultats plus précis dans le cas d'opérations de lâchure et de chasse, mais la quantité nécessaire de données recueillies in situ est importante et les calculs très compliqués.

Des modèles bi- et tridimensionnels d'alluvionnement de retenue ont été établis, mais leur utilisation est limitée du fait des quantités considérables de données relevées in situ nécessaires pour la vérification de ces modèles.

6.3. MODÈLES PHYSIQUES

Des modèles physiques sont largement utilisés pour l'étude des processus d'alluvionnement dans les retenues. Des modèles à fond mobile, à échelle distordue, sont le plus souvent utilisés et il importe de simuler le comportement de l'ouvrage réel en termes de critères de similitude : gravité, résistance, décantation, suspension, mouvement d'amorçage, concentrations et déformation du lit. En pratique, seuls les principaux critères de similitude sont satisfaits, et les autres dans une moindre mesure (*Tan*, 1994).

Pour les lits à fond mobile, des matériaux de faible masse volumique, tels que du polystyrène, de la bakélite, du talc, des coquilles de noix écrasées et des cendres volantes, ont été utilisés dans les modèles. La distorsion des échelles géométriques est souvent nécessaire dans le cas d'un modèle à fond mobile afin d'assurer des profondeurs d'eau et des vitesses suffisamment élevées à l'intérieur de l'espace limité du laboratoire (*Zhang et al.*, 1983).

La vérification des résultats de l'étude sur modèle à partir des données recueillies sur l'ouvrage réel est d'une grande importance. Les dépôts dans la retenue Danjianghou, Chine, sur une période de 14 ans furent vérifiés et des différences de moins de 20 % furent notées (*Yang Guowei et al.*, 1992).

L'utilisation combinée de modèles physiques et de modèles mathématiques est adoptée pour les grands aménagements et les résultats obtenus servent souvent à compléter les résultats déduits d'autres techniques de modélisation, de façon à compenser leurs imperfections respectives (*Shepherd*, 1993; *Jordaan*, 1989).

Exemples

– Dans un modèle physique concernant **l'aménagement de Gezhouba**, Chine, les débits solides en suspension, les débits solides de charriage, ainsi que les courants de densité furent simulés et les résultats comparés avec les données recueillies in situ. Les volumes et la répartition des dépôts, les granulométries et l'efficacité des chasses par érosion peuvent être vérifiés avec les données recueillies in situ (*Chai et al.*, 1983).

– Pour **l'aménagement des Trois Gorges**, Chine, 9 modèles ont été réalisés pour simuler 6 tronçons-clés sur une distance totale de 230 km. Les échelles horizontales et verticales des modèles étaient respectivement :

$$\frac{1}{250} \text{ à } \frac{1}{300} \text{ et } \frac{1}{100} \text{ à } \frac{1}{125} \quad (\text{Tan}, 1994)$$

– sediment concentration not equal to sediment carrying capacity adjustments in space and time.

Such a model has been used on the Yangtze River, China (*Han et al.* 1973, 1990, *Zhou*, 1993). Although such models should provide more accurate results for sluicing/flushing operational conditions, the required amount of field data is extensive and the computations highly complicated.

Two- and three-dimensional reservoir sedimentation models have been developed, but their use is limited due to the extensive field data sets required for verification of these models.

6.3. PHYSICAL MODELLING

Physical models are extensively used to study sedimentation processes in reservoirs. Distorted scale movable bed models are mostly used and it is important to simulate the prototype behaviour in terms of similarity criteria: gravity, resistance, settling, suspension, incipient motion, concentrations and bed deformation. In practice only the main similarity criteria are satisfied, and the others to a lesser extent (*Tan*, 1994).

For movable beds light-weight materials such as polystyrene, bakelite, talcum, crushed walnut shells and fly-ash, have been used in models. Distortion of the geometric scales is often necessary for a model with a movable bed to provide large enough water depths and velocities within limited laboratory space (*Zhang et al.*, 1983).

Verification of model output with prototype data is of great importance. Deposition in the Danjianghou Reservoir, China, over a 14-year period was verified and differences of less than 20 % were noted (*Yang Guowei et al.*, 1992).

The combined use of physical and mathematical models is practised on large projects and the results obtained are used to often complement results from other modelling techniques so as to compensate for their respective shortcomings (*Shepherd*, 1993; *Jordaan*, 1989).

Case studies

– In a physical model of the **Gezhouba project**, China, suspended loads, bed load and as well as density currents were simulated and results compared well with prototype data. The volumes and distribution patterns of deposits, particle size distribution and efficiency of scouring could be verified with field data (*Chai et al.*, 1983).

– For the **Three Gorges project**, China, 9 models have been constructed to simulate 6 key reaches over a total distance of 230 km. Horizontal and vertical model scales used in these models were respectively :

$$\frac{1}{250} \text{ to } \frac{1}{300} \text{ and } \frac{1}{100} \text{ to } \frac{1}{125} \quad (\text{Tan, 1994})$$

7. CONCEPTION DES ÉVACUATEURS DE FOND POUR LES OPÉRATIONS DE LÂCHURE/CHASSE

7.1. GÉNÉRALITÉS

Les évacuateurs de fond peuvent être utilisés pour l'évacuation des crues, la vidange des retenues, les lâchures de sédiments et pour empêcher l'entrée de sédiments dans les prises d'eau, etc. Pour la maîtrise de l'alluvionnement des retenues, les évacuateurs de fond seront conçus (et exploités) pour conserver la capacité de stockage à long terme. Les conditions hydrologiques et hydrauliques, spécialement au cours des périodes de crue et de forte charge solide, seront analysées afin de concevoir des évacuateurs appropriés. Les évacuateurs de fond seront situés suffisamment bas pour permettre des chasses avec baisse du plan d'eau et auront une capacité d'évacuation suffisante.

De nombreux barrages en service n'ont pas d'évacuateurs de fond ou ces évacuateurs ont de faibles capacités de débit. La reconstruction d'évacuateurs de fond a été réalisée sur des ouvrages en service (par exemple, barrages Sanmenxia, Shuicaozi et Linjiaxia, Chine), mais de tels travaux sont généralement coûteux et dans de nombreux cas techniquement difficiles (*Delft Hydraulics*, 1992).

Lorsque la capacité de débit de l'évacuateur de fond est trop faible, un niveau bas de retenue ne peut être maintenu et les sédiments érodés provenant des tronçons amont (delta) se déposeront uniquement près du barrage (remobilisation). Au cours de ces dernières années, la tendance est à l'adoption d'évacuateurs de fond de grandes dimensions, à niveau bas, qui conduiront à des changements aussi faibles que possible dans l'équilibre des sédiments de la rivière (*White*, 1990).

7.2. CAPACITÉ DE DÉBIT DES ÉVACUATEURS DE FOND

Plusieurs règles relatives au dimensionnement des évacuateurs de fond ont été présentées :

- En vue de préserver la capacité du lit majeur aussi longtemps que possible, les évacuateurs de fond seront suffisamment dimensionnés pour passer une crue de période de retour de 5 à 10 ans sans inondation du lit majeur et avec des dépôts limités (*Zhang et Qian*, 1985; *Rooseboom*, 1985). Très souvent, cela conduit à des ouvrages d'évacuation de très grandes dimensions et très coûteux.

- Pour la conception des évacuateurs de fond de retenues chinoises, *Jiang* (1980) fournit des règles simples. De façon simplifiée, il est requis que la capacité maximale d'évacuation à écoulement libre de l'ouvrage de fond soit supérieure à la moitié du débit d'écoulement du lit, qui sera déterminé. Ce débit d'écoulement du lit correspond le plus souvent au débit de la crue de période de retour de 5 ans.

7. THE DESIGN OF OUTLETS FOR SLUICING/FLUSHING OPERATIONS

7.1. GENERAL

Bottom outlets may be used for undersluicing of floods, emptying of reservoirs, sluicing of sediments and preventing sediment from entering intakes, etc. For the control of reservoir sedimentation, bottom outlets should be designed (and operated) to preserve reservoir storage in the long term. Hydrological and hydraulic conditions, especially during high flows and high sediment load periods, should be analysed in order to design suitable outlets. The bottom outlets should be located low enough to enable draw-down flushing and should have sufficient discharge capacity.

Many existing dams do not have bottom outlets or the outlets have small discharge capacities. Reconstruction of outlets afterwards has been carried out (Sanmenxia, Shuicaozi and Linjiaxia Dams, China), but it is generally believed to be uneconomic and in many cases technically difficult (*Delft Hydraulics*, 1992).

When the outlet capacity is too small, a low reservoir level cannot be maintained and sediment eroded from the upper reaches (delta) will only be deposited closer to the dam (reworking). In recent years the trend is towards larger low level bottom outlets which will ensure as little change as possible in the river sediment balance (*White*, 1990).

7.2. DISCHARGE CAPACITY OF BOTTOM OUTLETS

Several design rules for discharge capacities have been presented :

– In order to preserve the flood plain capacity as long as possible, the bottom outlets should be large enough to pass a 1-in-5 to 1-in-10-year flood without inundation of the flood plains and with only limited deposition (*Zhang and Qian*, 1985; *Rooseboom*, 1985). In most cases this would result in very large and expensive outlet structures.

– For the design of bottom outlets in Chinese reservoirs, *Jiang* (1980) provides simple rules. Simplified, it requires that the maximum free discharge capacities of the outlets should be greater than half the bed forming discharge, which should be determined. The bed forming discharge agrees in many cases to a 1-in-5-year flood discharge.

L'approche empirique de *Jiang*, basée sur la pratique chinoise, indique :

$$\text{Si } \frac{Q_m}{Q_c} \cdot \frac{J_n}{J_0} \geq 0,5$$

la capacité de transport solide du lit mineur dans une retenue sera suffisante pour assurer un équilibre à long terme entre érosion et dépôt,

avec

Q_m : débit maximal à écoulement libre des évacuateurs de fond, sans rétention de crue,

Q_c : débit dominant de la rivière,

J_n : pente de la ligne reliant l'extrémité amont du niveau maximal de retenue avec le fond des évacuateurs de fond,

J_0 : pente initiale de la rivière

– En Russie, les chasses avec baisse du plan d'eau dans trois retenues hydroélectriques furent optimales en adoptant une capacité d'évacuation de 2 à 4 fois le débit annuel moyen.

– *Pitt et Thompson* (1984) ont proposé une capacité d'évacuation d'au moins deux fois le débit annuel moyen.

– *Singh* (1987) a proposé une capacité d'évacuation de 0,3 à 1 fois le débit entrant journalier maximal en vue de réduire le dépôt des sédiments grossiers.

– *Paul et Dhillon* (1988) ont décrit plusieurs exemples de chasses opérées avec succès en Russie, Chine, Venezuela, Inde, Taiwan et Iran, et proposent des évacuateurs de fond avec une hauteur optimale de 1,5 m à 2,5 m. Ils présentent des recommandations pour la détermination des dimensions optimales des évacuateurs de fond, ce qui peut être obtenu en modifiant la largeur des évacuateurs.

– Des méthodes empiriques plus détaillées ont été présentées en Chine (*SIHR et TU*, 1979; *SC*, 1992).

La plupart des capacités de débit requises pour les évacuateurs de fond et indiquées ci-dessus ont été obtenues à partir d'expériences in situ et sont utilisables en première approximation, mais ne doivent pas faire l'objet d'une application générale. Chaque retenue a ses propres conditions aux limites et, compte tenu de l'importance de la retenue et de ses effets possibles sur l'environnement, il est recommandé d'exécuter des essais sur modèles mathématiques et/ou physiques (sous la direction d'un expert) afin de déterminer les capacités de débit appropriées des évacuateurs de fond et les consignes d'exploitation destinées à préserver les capacités de stockage à long terme.

7.3. DISPOSITIONS GÉNÉRALES DES ÉVACUATEURS DE FOND

Le point le plus important à examiner lors de la conception des évacuateurs de fond est leur niveau d'implantation. Il faut également étudier la disposition en plan et les dimensions des évacuateurs afin d'assurer des opérations efficaces de lâchure/chasse des sédiments et l'exploitation des usines hydroélectriques.

Jiang's empirical approach based on practice in China states :

If
$$\frac{Q_m}{Q_c} \cdot \frac{J_n}{J_o} \geq 0.5$$

the sediment transport capacity of the main channel in a reservoir will be sufficient to ensure a long-term balance between erosion and deposition,

with

Q_m : maximum free discharge of the outlets without flood detention,

Q_c : dominant discharge of the river,

J_n : slope of the line connecting the upstream end of the maximum pool level with the bottom of the outlets, and

J_o : original slope of the river

– In Russia, drawdown flushing at three hydro-electric reservoirs was optimal with a discharge capacity of 2 to 4 times the mean annual discharge.

– Pitt and Thompson (1984) have proposed a discharge capacity of at least twice the mean annual discharge.

– Singh (1987) has proposed a discharge capacity of 0.3 to 1 times the maximum daily flood inflow to reduce deposition of coarse sediments.

– Paul and Dhillon (1988) have documented several examples of successful flushing operations in Russia, China, Venezuela, India, Taiwan and Iran and propose bottom outlets with an optimum height of 1.5 m to 2.5 m. They present rough guidelines for determining the optimum size of bottom outlets which can be achieved by altering the width of the outlet(s).

– More detailed empirical methods have been presented in China (SIHR and TU, 1979; SC, 1992).

Most of the required bottom outlet discharge capacities indicated above have been obtained from field experience and can be used as a rough guideline but should not be generally applied. Each reservoir has its own specific boundary conditions and depending on the importance of a reservoir and its possible impact on the environment, it is recommended that detailed analytical and/or physical model tests (by an expert) are carried out to determine suitable outlet discharge capacities and operation rules to preserve storage capacities in the long term.

7.3. LAYOUT OF BOTTOM OUTLETS

The most important consideration in planning bottom outlets is the elevation of the outlets. Other considerations include the plan layout and dimensions of the outlets in order to ensure efficient sluicing/flushing of sediment and operation of hydro power-stations.

(i) Niveau d'implantation

Le niveau idéal des évacuateurs de fond est le niveau initial du lit de la rivière, et de préférence un niveau ne dépassant pas la profondeur relative d'eau de 0,15 à 0,2 comptée à partir du lit (*Xu et Lu*, 1991). Des évacuateurs à niveau bas peuvent passer des charges solides en suspension près du lit, à des concentrations relativement élevées, ainsi que des particules grossières. Pour les chasses avec baisse du plan d'eau ou les opérations de vidange, les évacuateurs seront implantés suffisamment bas pour assurer une érosion régressive des dépôts de sédiments dans la retenue. Aux prises d'eau des usines hydroélectriques, les évacuateurs de fond seront situés au-dessous de ces prises pour constituer des zones d'érosion locales autour des prises. Pour l'évacuation des courants de densité, le niveau des évacuateurs de fond sera plus bas que celui de l'interface entre le courant chargé de sédiments et la masse d'eau supérieure.

(ii) Situation en plan

Les évacuateurs de fond seront implantés dans le lit mineur initial de la rivière et sur le côté concave d'une courbe de la rivière. La détermination de l'emplacement des évacuateurs de fond sera aussi basée sur la limitation de l'alluvionnement aux prises d'eau.

(iii) Dimensions de l'évacuateur de fond

Les dimensions de la section transversale de l'évacuateur de fond dépendent de la capacité de débit requise. Généralement, plus d'un évacuateur sont installés et l'espace entre évacuateurs sera tel que la zone d'érosion locale devant les évacuateurs couvre toutes les prises d'eau alimentant les turbines. *Paul et Dhillon* (1988) ont recommandé un évacuateur de section rectangulaire, avec une hauteur optimale de 1,5 m à 2,5 m, tenant compte des données recueillies sur le site. Des exemples d'évacuateurs de fond sont donnés par *Fan* (1985).

7.4. OBSTRUCTION DES ÉVACUATEURS DE FOND

Le colmatage des évacuateurs de fond par des sédiments et autres détritiques sera empêché dans toute la mesure du possible, car une telle obstruction perturbera sérieusement l'exploitation des évacuateurs. *Di Silvio* (1987) a étudié l'obstruction d'évacuateurs de fond sur un modèle physique et a conclu que les phases initiale et finale d'une chasse sont les plus critiques pour la prévention de l'obstruction des évacuateurs. Les évacuateurs seront suffisamment dimensionnés, en tenant compte de la longueur de la galerie d'évacuation et de la hauteur initiale des sédiments au-dessus des évacuateurs.

Lorsque des évacuateurs de fond sont bloqués par des sédiments au cours d'opérations de chasse, il est recommandé de fermer les évacuateurs et d'appliquer par la suite des chasses sous pression (avec surélévation du niveau d'eau) pour nettoyer les évacuateurs (*Krumdieck et Chamot*, 1979). Une chasse à écoulement libre et une chasse sous pression peuvent être effectuées alternativement (*Cavor et Slavic*, 1983).

Si des sédiments se sont déposés contre les vannes des évacuateurs, la force de levage nécessaire pour ouvrir les vannes peut augmenter de 16 % à 33 %. À la

(i) **Elevation**

The ideal elevation of bottom outlets is at the original river-bed level, preferably not higher than the relative water depth 0.15 to 0.2 from the bed (*Xu and Lu, 1991*). Low outlets can pass suspended load near the bed at relatively high concentrations as well as coarse particles. For drawdown flushing or emptying, the outlets should be low enough in order to ensure retrogressive erosion of sediment deposits in the reservoir. At hydro power intakes bottom outlets should be below the intakes to form local scour zones around the intakes. For venting of density currents the elevation of bottom outlets should be lower than the interface between the sediment laden stream and upper water mass.

(ii) **Plan location**

Bottom outlets should be in the original main river channel and on the concave side of a river bend. The determination of the location of the bottom outlets should also be based on limitation of sedimentation at the intakes.

(iii) **Outlet dimensions**

The outlet cross-sectional area is related to the required discharge capacity. Usually more than one outlet is installed and the spacing between outlets should be such that the local scour zone in front of outlets cover all the intakes to turbines. *Paul and Dhillon (1988)* recommended a rectangular outlet, with optimum height of 1.5 m to 2.5 m, based on field data. Some examples of bottom outlets are given by *Fan (1985)*.

7.4. OBSTRUCTION OF THE OUTLETS

Clogging of the bottom outlets by sediment/debris should be prevented as far as possible because it will seriously hamper operation of the outlets. *Di Silvio (1987)* examined the obstruction of bottom outlets in a physical model and concluded that the initial and final phases of flushing are the most critical to prevent clogging of the outlets. The outlets should be sufficiently large in relation to the outlet tunnel length and the initial depth of the sediments above the outlets.

When bottom outlets are blocked with sediment during flushing it is recommended that the outlets be closed and subsequent flushing under pressure (raised water level) be applied to clear the outlets (*Krumdieck and Chamot, 1979*). Free flow flushing and flushing under pressure can be applied alternatively (*Cavor and Slavic, 1983*).

If sediment is deposited against outlet gates the required lift force to open the gates may increase by 16% - 33%. At Guanting Reservoir, China, the elevation of

retenue Guanting, Chine, le niveau des sédiments au droit des vannes est contrôlé et les vannes sont périodiquement ouvertes sur de courtes périodes pour éroder les dépôts devant les vannes (*Delft Hydraulics*, 1992).

7.5. ABRASION

Les évacuateurs seront protégés contre l'action fortement abrasive des sédiments évacués. Des matériaux résistant à l'abrasion seront utilisés pour le revêtement des évacuateurs (*Lu*, 1991).

À la retenue Sanmenxia, Chine, des débits avec teneur élevée en sédiments (62 kg/m^3 au cours de la saison des crues), à des vitesses de 14 à 20 m/s, causèrent des trous dans le béton, de 14 à 20 cm de profondeur. Une étude de matériaux résistant à l'abrasion (*Wei*, 1991) a permis les constatations suivantes :

- les résines époxydes et mortier donnent les meilleurs résultats, mais des prescriptions technologiques rigoureuses limitent leur utilisation à grande échelle,
- la plaque d'acier et le béton de surface unie ont une faible résistance à l'abrasion,
- le béton à résistance élevée (60 MPa) peut être utilisé à un coût relativement faible,
- les vitesses maximales admissibles pour éviter une sévère abrasion sont de 10 m/s, 12 m/s et 25 m/s respectivement pour la plaque d'acier, le béton de surface unie et le béton de résistance élevée.

Lorsque des dalles, des plaques ou des blocs, constitués de matériaux résistant à l'abrasion (matériaux naturels, artificiels, métalliques ou non métalliques) sont utilisés, les joints sont souvent le point faible de résistance à l'abrasion.

sediment at the gates is monitored and the gates are periodically opened for short periods to scour deposits in front of the gates (*Delft Hydraulics*, 1992).

7.5. ABRASION

The outlets should be protected against the highly abrasive action of discharged sediment. Some abrasion-resistant material should be used to cover the outlets (*Lu*, 1991).

At Sanmenxia Reservoir, China, high sediment load discharges (62 kg/m^3 during the flood season) at velocities of 14 to 20 m/s caused pits and holes in the concrete, 14 cm to 20 cm deep. A study of abrasion-resistant materials (*Wei*, 1991) has revealed that :

- epoxy resins and mortar yielded best results, but strict technological requirements limit its large-scale use
- steel plate and plain concrete have low abrasive resistance
- high-strength concrete (60 MPa) can be used at relatively low cost
- maximum allowable velocities to avoid severe abrasion are 10 m/s, 12 m/s and 25 m/s for steel plate, plain concrete and high-strength concrete respectively.

When slabs, plates or blocks of abrasion-resistant material (natural, artificial, non-metal or metal) are used, the joints are often the weak link in determining the abrasive resistance.

8. PROJET ET UTILISATION DE RESSOURCES EN EAU : MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT

Dans un projet de ressources en eau, le choix du site du barrage et le mode d'exploitation sont des facteurs importants à prendre en compte pour la maîtrise de l'alluvionnement.

8.1. CHOIX DU SITE DU BARRAGE

De nombreux facteurs interviennent dans le choix d'un site pour un nouveau barrage. Ceux concernant l'alluvionnement sont les suivants :

- les bassins versants seront aussi petits (en relation avec la demande d'énergie hydraulique) que possible (solution idéale),
- des bassins versants avec faibles apports solides seront choisis, si possible,
- aucune grande ville ou infrastructure importante ne sera située près de la zone de remous de la retenue,
- une topographie permettant de dériver les sédiments sera retenue, si possible,
- la capacité optimale de stockage sera déterminée afin d'obtenir un rapport approprié capacité/apports permettant d'effectuer des lâchures/chasses de sédiments de la retenue,
- si possible, les caractéristiques de la cuvette de la retenue doivent faciliter les lâchures, chasses ou écoulement des courants de densité,
- des solutions de stockage en dehors du lit de la rivière seront examinées de très près,
- le dimensionnement pour l'accumulation des sédiments sera étudié.

8.2. CHOIX DES TECHNIQUES DE MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT

Dans les études économiques d'un projet de ressources en eau, divers critères, incluant les faisabilités technique, institutionnelle, financière et économique, la répartition des profits et l'acceptabilité environnementale, s'appliquent. L'évaluation des effets de la maîtrise de l'alluvionnement doit incorporer des données monétaires, physiques et qualitatives, des approches aux critères multiples convenant le mieux à ce propos (*Delft Hydraulics*, 1992).

Deux coefficients empiriques peuvent être utilisés dans un jugement préliminaire pour décider du mode d'exploitation pour la maîtrise de l'alluvionnement, à savoir le rapport capacité de retenue-apports par ruissellement (K_w) et le rapport capacité de retenue-apports de sédiments (K_r), comme indiqué dans la Fig. 1 (*Basson*, 1996). Basés sur des données recueillies dans 28 retenues chinoises (*SIHR et TU*, 1979), les paramètres suivants peuvent être utilisés pour choisir le(s) mode(s) approprié(s) d'exploitation :

8. WATER RESOURCES PLANNING AND DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION CONTROL

In water resources planning for sedimentation control the selection of the dam site and the mode of operation are important factors to consider.

8.1. SELECTION OF DAM LOCATION

Many factors are involved in selecting a new dam site. Those related to sedimentation are as follows :

- catchments should be as small (related to the required yield/hydropower demand) as possible (ideal condition)
- low sediment yield catchments should be selected, if possible
- no major cities, towns or infrastructure should be located near the backwater region of the reservoir
- topography suitable for sediment bypassing should be utilized if available

- the storage capacity should be optimized to give suitable capacity-inflow ratio in order to operate for sediment sluicing/flushing of storage reservoir

- if possible, reservoir basin characteristics should facilitate sluicing, flushing or density current venting
- off-channel storage options should be seriously considered

- sizing for sediment accumulation

8.2. SELECTION OF SEDIMENTATION CONTROL TECHNIQUES

In economic analyses of a water resources project, various criteria including technical, institutional, financial and economic feasibility, equity and ecological sustainability, apply. Impact assessment of sedimentation control has to incorporate monetary, physical and qualitative data, which can best be addressed by multiple-criteria approaches (*Delft Hydraulics*, 1992).

Two empirical indexes can be used in preliminary judgement to decide on the mode of operation for sedimentation control, namely the capacity-inflow ratio (K_w) and the capacity-sediment inflow ratio (K_r) as indicated in Figure 1 (*Basson*, 1996). Based on data of 28 reservoirs in China (*SIHR and TU*, 1979) the following parameters can be used to select the appropriate operation mode(s) :

Tableau 6 - Recommandations concernant le mode d'exploitation d'une retenue pour la maîtrise de l'alluvionnement

K_r	K_w	Mode d'exploitation favorable
> 50	> 0,2	opération de stockage (*)
< 20 - 30	< 0,1	régularisation de l'eau et des sédiments (**)
30 - 50	0,1 - 0,2	stockage et maîtrise de l'alluvionnement alternés

(*) **Dans l'opération de stockage**, la retenue a un coefficient élevé d'utilisation des ruissellements. Elle est exploitée en maintenant le niveau de retenue aussi haut que possible, la plupart des sédiments entrants étant ainsi captés. Seuls de faibles débits solides traverseront la retenue par écoulement des courants de densité. Ce type d'exploitation est donc appliqué aux retenues de capacité de stockage relativement importante avec faibles apports solides.

(**) **La régularisation de l'eau et des sédiments** nécessite des opérations de lâchure/chasse (et l'action des courants de densité) : au cours de la saison des crues un niveau bas de retenue est maintenu pour limiter l'alluvionnement, et à la fin de la saison des crues le niveau de retenue est remonté pour stocker de l'eau claire.

Lorsque $K_r < 25 - 30$, la perte annuelle moyenne de stockage dépassera 2 % (Zhang et Qian, 1985). En Chine, lorsque $K_r < 100$ à 50, l'alluvionnement est considéré comme un problème sérieux devant être traité avec beaucoup de soin (Tan, 1994).

Les réservoirs de **rétenion des crues** sont exploités en vue de maintenir un écoulement libre dans le lit au cours de la saison des crues; un équilibre d'alluvionnement peut être établi en quelques jours d'exploitation si la rétenion des crues est telle que les dépôts dans le lit majeur sont réduits.

L'effet des divers modes d'exploitation d'une retenue est bien illustré par l'expérience acquise à la retenue Sanmenxia, Chine (Delft Hydraulics, 1992) :

**Tableau 7
Modes d'exploitation et alluvionnement de la retenue Sanmenxia, Chine**

Période	Exploitation (*)	Niveau d'eau au barrage		Sédiments évacués en % des sédiments entrants
		Maximal	Moyen	
9/60 - 3/62	A	332,58	324,04	6,8
4/62 - 7/66	B	325,90	312,81	58,0
7/66 - 6/70	C	320,13	310,00	82,5
7/70 - 10/73	D	313,31	298,03	105,0
11/73 - 10/78	D	317,18	305,60	100,0

- (*) A Stockage d'eau
 B Rétenion de crue et lâchure à travers 12 évacuateurs à 300 m
 C Chasse par ouverture de 2 galeries et de 4 conduites
 D Chasse : 2 galeries, 4 conduites, 8 ouvrages de dérivation

Table 6 - Guidelines for reservoir operation and sedimentation design

K_T	K_w	Favourable operation mode
> 50	> 0.2	storage operation*
< 20 - 30	< 0.1	regulation of water and sediment**
30 - 50	0.1 - 0.2	storage and sedimentation control alternating

(*) **In Storage operation** the reservoir has a high coefficient of run-off utilization. It is operated by keeping the pool level as high as possible, thereby trapping most incoming sediments. Only small sediment loads will be passed through by density current venting and therefore this type of operation is applied at reservoirs with low sediment yields and relatively large storage capacities.

(**) **Regulation of water and sediment** involves sediment sluicing/flushing (and density current venting) whilst maintaining a lower pool level during the flood season to limit sedimentation, and at the end of the flood season the pool level is raised to store clear water.

When $K_T < 25 - 30$, the mean annual storage loss will exceed 2 % (*Zhang and Qian, 1985*). In China, when $K_T < 100$ to 50, sedimentation is considered a serious problem to be dealt with carefully (*Tan, 1994*).

Flood detention reservoirs are operated to maintain open channel flow during the flood season and sedimentation equilibrium could be established within a few years of operation if flood detention is such that flood plain deposition is minimized.

The effect of selecting different operating modes for a reservoir is well illustrated by experience gained at the Sanmenxia Reservoir, China (*Delft Hydraulics, 1992*):

**Table 7
Reservoir operation and sedimentation at Sanmenxia Reservoir, China**

Period	Operation (*)	Water level at dam		Sediment outflow as % inflow
		Maximum	Average	
9/60 - 3/62	A	332.58	324.04	6.8
4/62 - 7/66	B	325.90	312.81	58.0
7/66 - 6/70	C	320.13	310.00	82.5
7/70 - 10/73	D	313.31	298.03	105.0
11/73 - 10/78	D	317.18	305.60	100.0

- (*) A Storing water
 B Flood detention and sluicing through 12 outlets at 300 m
 C Flushing by opening 2 tunnels and 4 penstocks
 D Flushing : 2 tunnels, 4 penstocks, 8 diversion outlets

Fig. 1
 Reservoir operation and sedimentation control (Basson, 1996)
Exploitation de retenues et maîtrise de l'alluvionnement (Basson, 1996)

- (1) K_w = Reservoir capacity/mean annual runoff (1) K_w = Capacité de retenue/truissellement annuel moyen
- (2) K_r = Reservoir capacity/mean sediment yield (2) K_r = Capacité de retenue/ apports solides moyens
- (3) Storage operation (3) Opération de stockage
- (4) Flushing operation (4) Opération de chasse
- ▲ Flushing operation ▲ Opération de chasse
- (40) Long-term capacity as % original capacity (40) Capacité à long terme en % de la capacité initiale

Les **niveaux d'eau caractéristiques** se rattachent aux modes d'exploitation des retenues :

– Le **niveau de retenue normale (RN)** détermine la capacité de la retenue et sera fixé en considérant les profits actuels et futurs, ainsi que les impacts de la retenue en termes d'alluvionnement prévu.

– Le **niveau minimal d'exploitation** dépend de la capacité de transport solide nécessaire pour faciliter les opérations de lâchure/chasse de sédiments, ou de la capacité de stockage pour la maîtrise des crues. De grandes différences entre le niveau RN et le niveau minimal d'exploitation peuvent conduire à une mauvaise production hydroélectrique, un niveau minimal d'exploitation bas pouvant signifier un faible profit de retenue.

– Le **niveau maximal** (niveau de crue) dépend de l'alluvionnement à l'amont, du volume et de la pointe de crue, des capacités de stockage et d'évacuation.

– Le **niveau de navigation** est situé entre le niveau RN et le niveau minimal d'exploitation et dépend des conditions de profondeur d'eau requises pour la navigation après la saison des crues.

Le mode d'exploitation ne nécessite pas d'être inflexible pour une retenue, mais peut changer avec les diverses étapes de perte de stockage. Une opération de stockage peut être poursuivie dans les retenues de grandes capacités par rapport aux charges solides, tandis que des opérations de lâchure/chasse peuvent être entreprises lorsque la perte de capacité de stockage atteint un certain niveau.

Le mode d'exploitation peut aussi être changé d'une année sur l'autre suivant la nature des apports. À la retenue Heisonglin, Chine, un niveau de retenue relativement élevé est maintenu au cours des saisons de faibles apports, des chasses étant effectuées au cours des années de forts débits.

Lors de l'étude de faisabilité du projet des Trois Gorges sur le fleuve Yangtze, Chine, le choix des niveaux caractéristiques de retenue a pris plus de 8 ans au cours desquels plusieurs modèles physiques et mathématiques ont été utilisés.

Characteristic water levels are related to the modes of operation of reservoirs :

- The **Full Supply Level** (FSL) (or normal pool level) determines the capacity of the reservoir and should be determined by considering current and future benefits and impacts of a reservoir in terms of expected sedimentation.

- The **minimum operating level** (MOL) depends on the required sediment transport capacity to facilitate sediment sluicing/flushing or storage capacity for flood control. Large differences between FSL and MOL could result in inefficient hydro power generation, while a low MOL can mean low reservoir benefit.

- The **maximum level** (flood level) depends on the headward sedimentation, flood volume and peak, storage and discharge capacities.

- The **navigation level** is between FSL and MOL and depends on navigational depth requirements after the flood season.

The method of operation need not be inflexible for a reservoir, but can change with different stages of storage loss. Storage operation may be continued in reservoirs with large capacities relative to sediment loads, while sluicing/flushing operation can be introduced once the loss of storage capacity reaches a certain stage.

The method of operation may also be changed from year to year according to the inflow patterns. At the Heisonglin Reservoir, China, a relatively high pool level is maintained during low inflow seasons, while flushing is done in high flow years.

Selection of characteristic pool levels in the feasibility planning of the Three Gorges Project on the Yangtze River, China, has taken more than 8 years during which several physical and mathematical models have been used.

9. RECOMMANDATIONS

Le projet et la gestion de ressources en eau doivent tenir compte des techniques examinées dans le présent Bulletin pour la maîtrise de l'alluvionnement des retenues destinée à assurer la viabilité à long terme d'un aménagement. Le concept de projet de barrage de coût élevé en capital et de coût d'entretien virtuellement nul est à réviser. Il est également nécessaire, au niveau des études de projet, d'incorporer le coût correspondant à la maîtrise de l'alluvionnement de la retenue.

Dans toutes les mesures hydrauliques de maîtrise d'alluvionnement d'une retenue, il est très important que le transport solide soit prédit avec précision. L'étalonnage à partir des données recueillies in situ est recommandé et les processus de transport solide dans des conditions de non-uniformité et de non-équilibre (pour les sédiments fins) doivent être pris en compte.

Des chasses lors des crues, avec baisse du niveau de retenue, et des lâchures peuvent être opérées avec succès, en disposant d'un excès d'eau suffisant, pour des valeurs recommandées du rapport capacité de retenue/apports par ruissellement inférieures à 0,03, bien que les valeurs de ce rapport puissent atteindre 0,10.

Le dragage d'une retenue pour récupérer un volume de stockage ne sera exécuté qu'après avoir évalué toutes les autres mesures de maîtrise.

Les impacts de la maîtrise de l'alluvionnement sur l'environnement seront étudiés avant mise en œuvre de ces mesures.

9. RECOMMENDATIONS

The planning and management of water resources should take into account the techniques discussed in this Bulletin to control reservoir sedimentation in order to ensure the long-term viability of a project. The concept of high capital cost and virtually zero maintenance cost dam projects could be reviewed. It is also necessary at the planning level to incorporate costs for the control of reservoir sedimentation.

In all of the hydraulic measures of reservoir sedimentation control, it is very important that sediment transport is accurately predicted. Calibration with field data is recommended and the processes of non-uniform and non-equilibrium sediment transport (for fine sediments) should be incorporated.

Flood flushing with reservoir drawdown, and sluicing can be practised successfully with enough excess water with recommended storage capacity : runoff ratios of < 0.03 , although ratios are as high as 0.10.

Dredging of reservoirs for storage recovery should only be carried out after evaluating all other control measures.

Environmental impacts of sedimentation control should be evaluated in detail before implementation of these measures.

10. REFERENCES

- ACKERS, P. and THOMPSON, G. (1987). Reservoir sedimentation and influence of flushing, Sediment transport in gravel-bed rivers, John Wiley & Sons, UK, pp 845-868.
- AITKEN, A.P. (1981). Aspects of erosion and sediment transport in Java, Indonesia, Problems of Soil Erosion and Sedimentation, South East Asian Regional Symposium, Thailand.
- AKIYAMA, J. and STEPHAN, H.G. (1984). Plunging flow into a reservoir: Theory, J. Hydr. Engrg., ASCE, 110 (4).
- AMINI, A. and FOULADI, C. (1985). Sediment flushing at the Sefid Rud Reservoir. 2nd Intern. Workshop on Alluvial River Problems.
- ANNANDALE, G.W. (1987). Reservoir Sedimentation, Vol. 29 in Developments in Water Science, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers.
- BASSON, G.R. (1996). Hydraulics of Reservoir Sedimentation. Ph.D. Dissertation, University of Stellenbosch.
- BASSON, G.R. and ROOSEBOOM, A. (1997). Dealing with Reservoir Sedimentation. South African Water Research Commission. To be published.
- BELL, H.S. (1942). Density currents as agents for transporting sediments, J. of Geology, Vol 50.
- BENJAMIN, T.B. (1968). Gravity currents and related phenomena, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 31, Part 2.
- BLACKWELDER (1986). In Delft Hydraulics (1992).
- BLANTON, J., et al (1980). Roseires Dam, US Department of the Interior, Foreign Disaster Assistance.
- BORDAS, M.P., et al (1988). Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires, IAHS - AISH Publication 174, pp 359-369.
- BRABBen, T.E. (1988). Reservoir desilting methods, Technical Note ODITN 32.
- BROWN, C.B. (1943). The control of reservoir silting, US Dept of Agriculture, Misc. Publ. No. 521.
- BRUK, S. (Editor) (1985). Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs, IHP-II Project.
- CAVOR, R. and SLAVIC, M. (1983). Mathematical model for reservoir flushing, Numerical methods in laminar and turbulent flow, Proc. 3rd Intern-Conf.
- CHAI, T., et al (1983). Sediment model for Gezhouba Water Control Project, Proc. of the 2nd ISRS, China.

- CHAIN, M.W. (1986). Reservoir sedimentation and desilting in Taiwan, Proc. of Conf. Water Forum '86 : World Water Issues in Evolution, USA.
- CHOLLET, J.P. and CUNGE, J.A. (1980). Simulation of unsteady flow in alluvial streams, Appl. Mathematical Modelling, Vol 4.
- COMITÉ FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES – Groupe de Travail (1982). Contrôle de l'alluvionnement des retenues, Q.54-R34, 14ème Congrès CIGB, Rio de Janeiro.
- CROWDER, B.M. (1987). Economic costs of reservoir sedimentation, a regional approach to estimating cropland erosion damage, J. Soil and Water Conservation 42, No 3, pp 194-197.
- DAI, J. (1980). A preliminary study on sediment excavation from a reservoir with siphon devices. Proc. Intern. Symp. on River Sedimentation, Beijing, D-6, Guanghai Press.
- DELFT HYDRAULICS (1992). The control of reservoir sedimentation - A literature review, Ministry of Development Co-operation, Government of the Netherlands.
- DEMAS (1991). Roseires Dam Emergency Dredging, Sudan, Progress report, Dredging, Engineering and Management Studies.
- DI SILVIO, G. (1990). Modelling desiltation of reservoir by bottom-outlet flushing, NATO ASI Series: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 312.
- DOGRA, B. (1985). The Indian experience with Large Dams, Environmental and social effects of Large Dams, vol. 1 & 2, UK, Wadebridge Ecological Centre.
- FAN, J. (1960). Experimental studies on density currents, Scientia Sinica, Vol. IX, No. 2.
- FAN, J., et al (1962). An approximate method for calculating the density currents in Reservoirs, Scientia Sinica, Vol. II (in Russian).
- FAN, J. (1985). Methods of preserving reservoir capacity, Lecture Notes on the Training Course on Reservoir Sedimentation, IRTCES.
- FAN, J. and MORRIS, G.L. (1992). Reservoir sedimentation II: Reservoir desiltation and long-term storage capacity, J. Hydr Engrg., Vol. 118, No. 2, ASCE.
- FAO (1975). In Delft Hydraulics (1992).
- FRENETTE, M., et al (1982). Cas Historique de Sédimentation du Barrage Peligre, Haiti, Canadian Civil Eng., 9, pp 206-223.
- FRIEDE (1994). Personal Communication, Swaziland Electricity Board.
- GARDE et al (1978). In Bruk (1985).
- GEZA et al (1953). Some observations on density currents in the laboratory and in the field, Proc. Minn. Intern. Hyd. Convention, IAHR-ASCE.
- GOLDSMITH, E., et al (1985). Sedimentation, the way of all dams, The Social and Environmental Effects of Large Dams, Vol. 1 pp 226-239. European Ecological Action Group.

- GRAF, W.H. (1983). The hydraulics of reservoir sedimentation, *Water Power and Dam Construction*, April.
- GUPTA and SINGHAL (1981). In *Delft Hydraulics* (1992).
- HACHATURIAN, A.G., et al (1966). Sedimentation and erosion in irrigation stilling basin and reservoir (in Russian).
- HAN, Q., et al (1973). Non-equilibrium transportation of sediment in reservoirs, Collection of reports on reservoir sedimentation, Yellow River Conservancy Commission (in Chinese).
- HAN, Q and HE, M (1990). A new mathematical model for reservoir sedimentation and fluvial process, *Intern J of Sediment Research*, Vol. 5, No 2.
- HASKONING (1988). Internal report to Swaziland Electricity Board.
- HENGYUE, G., et al (1989). Spatial and Temporal Dynamics of Land Degradation and Fluvial Erosion in the middle and upper Yangtze River Basin, China, *Land Degradation and Rehabilitation*, 1989, Vol. 1, pp 217-235.
- HOLLY, F.M., and RAHUEL, J.L. (1990). New numerical/physical framework for mobile-bed modelling, *J. Hydr. Res. IAHR*, Vol. 28, No 4-5.
- HOWARD, C.S. (1953). Density currents in Lake Mead, *Proc. Minn. Intern. Hyd. Convention*, IAHR-ASCE.
- HU, S. (1990). Self-weight consolidation on impervious bases. MSc Thesis HH42, Int. Inst. for Hydr. and Environmental Engrg, IHE, Delft, the Netherlands.
- HWANG, J.M. (1985). Proposed reservoir desilting system in Taiwan, *Water Forum '86: World Water Issues in Evolution, USA*.
- ICOLD Bulletin 64 (1988). Register of dam heightenings/Registre des surélévations de barrages.
- ICOLD Bulletin 67 (1989). Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues.
- JANCOLD, (1997). Personal Communication.
- JIANG, N. (1980). Some investigation of reservoir sedimentation on a heavily silt laden stream, *J. Sediment Research*, No 1 (in Chinese).
- JIAO, E. and LIAO, X. (1989). Research on sediment problems of Bajiazui Reservoir, *Proceedings 4th Intern. Symp. River Sedimentation*, Beijing, China.
- JORDAAN, J.M. (1989). The sediment problem in South African reservoirs. *Proceedings of the International Symposium on Sediment Transport Modelling, USA*, pp 795-800.
- KAO, T.W. (1977). Density currents and their application, *J. of Hydr. Engrg. ASCE*, Vol. 103, HY5.
- KARVIGH, H.A. (1991). Modelling of reservoir flushing, *Intern. Symp. on the Transport of suspended sediment and its mathematical modelling*, Italy.
- KERESLIDZE, N.B., et al (1985). Silting and flushing mountain reservoirs, exemplified by the Rioni series of hydroelectric stations. *Hydrotech. Constr.* Vol. 19, No 9.

- KEULEGAN, G.H. (1944). Laminar flow at the interface of two liquids, Research paper 1591, Journal of Research, National Bureau of Standards, Vol. 32.
- KEUNEN, H., et al (1950). Density currents as a cause of graded bedding, The Journal of Geology, Vol. 58, No 2.
- KRUMDIECK, A. and CHAMOT, P. (1979). Sediment flushing at Santo Domingo Reservoir, Water Power and Dam Construction.
- LARA, J.M. (1960). The 1957 sedimentation survey of Elephant Butte Reservoir, Bureau of Reclamation, USDI.
- LARONNE, J.B. (1990). Probabilistic distribution of event sediment yields in the Northern Negev, Israel, Wiley - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France, pp 481-492.
- LE MOIGNE, G., et al (1990). Dam Safety and the Environment, World Bank Technical Paper No 115, pp 174.
- LU, X. (1990). In Delft Hydraulics (1992).
- LU, X. (1991). The function of bottom outlet for sluicing sediment in a Reservoir, unpublished paper.
- LU, X. (1992). An approximate method for calculating the efficiency of venting density current through outlet, Proc. of the 5th ISRS, Vol. II, Germany.
- MADDOCK, T. (1948). Reservoir problems with respect to sedimentation, Proc. Federal Interagency Sedimentation Conference.
- MAHMOOD, K. (1987). Reservoir Sedimentation, Impact, Extent and Mitigation, World Bank technical paper, No 71.
- MEADE, R.H. and PARKER, R.S. (1985). Sediment in rivers of the United States, National Water. Summary 1984, USGS Water Supply Paper 2275, Washington, D.C.
- MEIJERINK, A. (1977). Sediment yields at Java, ITC journal no 4.
- MIDDLETON, G.V. (1966). Experiments on Density Currents, Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 3, No 4.
- NOSE, M. (1982). Present trends in construction and operation of dams in Japan, Trans. 14th ICOLD, G.P.1, V.3.
- OKADA et al. (1982). Sediment release plan at Sakuma Reservoir, Trans. 14th ICOLD, Q54, R4, Brazil.
- PARHAMI, F. (1986). Sediment control methods in Sefid-Rud Reservoir, Iran, Proc. 3rd Int. Symp on River Sedimentation, USA.
- PAUL, T.C. and DHILLON, G.S. (1988). Sluice dimensioning for desilting reservoirs, Intern. Water Power and Dam Construction, Vol. 40 No 5.
- PEART, M.R. (1992). Afforestation and sedimentation production in Hong Kong, Proc. of the 5th ISRS, Vol. II, Germany.
- PITT, J.D. and THOMPSON, G. (1984). The impact of sedimentation on reservoir life, Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proc. of the Harare Symp., IAHS publ., No 144.

- POSTEL, S. (1989). Water for agriculture, facing the limits, Worlds/Watch paper 93.
- PU, N. and SU, F. et al (1980). Some problems of sedimentation in Liujiaxia and Yanguoxia Reservoirs, Proc. Intern. Symposium on River Sedimentation, D4, Beijing.
- QIAN, N. (1982). Reservoir sedimentation and slope stability technical and environmental effects, Trans. 14th ICOLD, G. R54, Brazil.
- QIAN, Y., et al (1993). Influence of the upstream reservoirs on the adjustment of downstream alluvial channel, Intern. J. of Sediment Research, Vol. 8, No 3.
- REED (1931). In Delft Hydraulics (1992).
- RIENOSL, K., and SCHNELLE, P. (1982). Sedimentation of small reservoirs in the high Alps, Trans 14th ICOLD, Vol. III, Q54, R5, Brazil.
- ROOSEBOOM, A. (1975). Sediment deposition in reservoirs, Technical Report No. 63. Department of Water Affairs and Forestry, South Africa (In Afrikaans).
- ROOSEBOOM, A. (1985). Sediment transport in rivers and reservoirs. Lecture notes, University of Pretoria.
- ROOSEBOOM, A. and MULKE, F.J. (1982). Erosion initiation, Proc. symp. on recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield, IAHS Publication No 137.
- ROOSEBOOM, A. (1992). Sediment Transport in Rivers and Reservoirs - A South African Perspective, Water Research Commission Report No 297/1/92, South Africa.
- ROOVERS, M. (1989). The removal, treatment and use of sediment from reservoirs, Water Power & Dam Construction, Vol. 40, No 3.
- ROSENBRAND (1991). In Delft Hydraulics (1992).
- SANCHEZ, J.C. (1982). Mathematical model for simulation of delta formation and erosion downstream of a reservoir, Trans. 14th ICOLD, Vol III, Q54, R8, Brazil.
- SAVAGE, S.B. and BRIMBERG, J. (1975). Analysis of plunging phenomena in water reservoirs, J. of Hyd. Research, Vol. 13, No. 2.
- SC (Sedimentation Committee) (1992). Sedimentation Handbook (in Chinese).
- SCHEUERLEIN, H. (1987). Sedimentation of reservoirs. Methods of prevention, techniques of rehabilitation, Iranian Nat. Comm. Large Dams.
- SCHEUERLEIN, H. (1993). Estimation of flushing efficiency in silted reservoirs, Proc. of the 1st ICHE, Vol. 1, Part A, USA.
- SCHIFF, J.B., et al (1953). Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, IAHR-ASCE, Minneapolis.
- SHENG, Y.P. (1983). Mathematical modelling of three-dimensional coastal currents and sediment dispersion. Model development and application. Tech. Rep. CERC-83-2, ASCE.

- SHEPHERD, I.E. (1993). Physical modelling control and instrumentation: recent developments at HR Wallingford, Proc. of the 1st ICHE, Vol I, Part B, USA.
- SHIOZAWA, K. (1974). Sedimentation in Miwa Reservoir and its dredging programme, Dams in Japan, No 362. (In Japanese)
- SIHR (Shaanxi Institute of Hydrotechnical Research), and TU (1979). Reservoir Sedimentation (in Chinese).
- SINGH, K.P. (1987). Lake sedimentation reduction techniques, Public Works, Vol 118, No 9.
- SINGH, K.P., et al (1990). Economic reservoir design and storage conservation by reduced sedimentation, J. Water Resources Planning and Management, V. 116, No.1, pp 85-98.
- SLOFF, C.J. (1991). Reservoir sedimentation, a literature survey. Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Report No 91-2.
- SMIL, V. (1987). Land degradation in China: an ancient problem getting worse, Land Degradation on Society, Blaikie and Brookfield eds. pp 214-223.
- SNCOLD (Swiss National Committee on Large Dams) (1982). General Paper 8, Trans 14th ICOLD, Vol. 3.
- TAKASU, S. (1982). Hydraulic design and model tests on sediment release facility of Unazuki Dam, Q54.R3, 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro.
- TAN, Y. (1994). Reservoir Design and Management to Control Sediment, Topic VI, Russia.
- THOMAS, W.A., and PRASUHN, A.L. (1977). Mathematical modelling of sediment transport, scour and deposition in river channels, 17th Congress IAHR, Germany.
- TRIMBLE, S.W. (1983). A sediment budget for Coon Creek Basin in the Driftless Area, Wisconsin, A.J. of Science, V. 283, pp 454-474.
- VASILIEV, O.F., et al (1993). Mathematical modelling of sedimentation in a deep reservoir, Proc. of the 1st ICHE, Vol. I, part A, USA.
- VOROBIEV, A.S., et al (1989). Combined removal of sediment from the Chiryurt Reservoir, Hydrotechnical Construction, Vol. 23, No. 8.
- WALLING, D.E. (1989). The erosion problem, Intern. J. Sediment Research, Vol. 4, No 1, pp 1-11.
- WANG, S.S.Y. (1993). Advances in Hydro-Science and Engineering, the Proc. of the 1st ICHE, USA.
- WEI, Y. (1991). Abrasion of the bottom outlets and its repair in Sanmenxia project, Int. J. of Sediment Research, V. 6, No 2.
- WHITE, W.R. and BETTES, R. (1984). The feasibility of flushing sediments through reservoirs, Challenges in African Hydrology and Water Resources, Zimbabwe, IAHS no 144.
- WHITE (1990). In Delft Hydraulics (1992).

- WOLMAN, M., et al (1989). Erosion control and reservoir deposition, Proceedings of Bilateral Seminar on problems in the lower reaches of the Yellow River, China, pp 139-163, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- XIA, Z., et al (1980). The long-term capacity of a reservoir, Proc. of the 1st ISRS, Vol 2, China.
- XIONG, G., et al (1989). Assessment of sediment reduction due to upland water and soil works in the Yellow River, Taming the Yellow River: Silt and Floods, pp 529-543, Kluwer Academic Publishers.
- XU, M., and LU, X. (1991). Reservoir sedimentation control strategies in China, Research report for Rural Development Consultants of Netherlands.
- YANG, Guowei., et al (1992). The advancement of physical modelling on sedimentation in the fluctuating backwater region of the Three-Gorges Reservoir, Proc. of the 5th ISRS, Vol. II, Germany.
- YANG, G. (1992). Mathematical modelling of alluvial rivers (in Chinese).
- YIH, C.S. (1980). Stratified flow, Academic Press, Inc. Ltd, UK.
- YOON, Y.N. (1991). The state and the prospects of the direct sediment removal methods from reservoirs. Proc. of Intern. Symp. on Special Problems of Alluvial Rivers, including those of Intern. Rivers, Korea.
- ZARN, B. (1992). Numerical simulation of sediment management in reservoirs planned along the River Rhine upstream of the Lake of Constance, Proc. of the 5th ISRS, Germany.
- ZHANG, H., et al (1976). Regulation of sedimentation in some medium and small-sized reservoirs on heavily silt-laden streams in China, Q47-R32, 12th ICOLD Congress, Mexico.
- ZHANG, H., et al (1983). Sediment-controlling problems in Yunnan hydro electric projects, Proc. of the 2nd ISRS, China.
- ZHANG, R. and QIAN, N. (1985). Reservoir Sedimentation, Lecture notes of the Training Course on Reservoir Sedimentation, IRTCES.
- ZHANG, Q. and LONG, Y. (1980). Sedimentation problems of Sanmenxia Reservoir, Proc. of the 1st ISRS, Vol 2, China.
- ZHANG, Q., et al (1983). A mathematical model for the prediction of the sedimentation process in rivers, Proc. of the 2nd ISRS, China.
- ZHAO, B. (1980). A preliminary analysis of headward silting of Hongshan Reservoir, J. Sediment Research, No 1 (In Chinese).
- ZHOU, B., et al (1989). Regulating water and sediment for preserving storage capacity in Hengshan Reservoir, Proc. of the 4th ISRS, Vol 2.
- ZHOU, Z. (1993). Two-D computer sedimentation models for the Three Gorges Project in China, Proc. of the 1st ICHE, Vol I, Part A, USA.

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : juin 1999
N° 19419
ISSN 0534-8293

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

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



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