

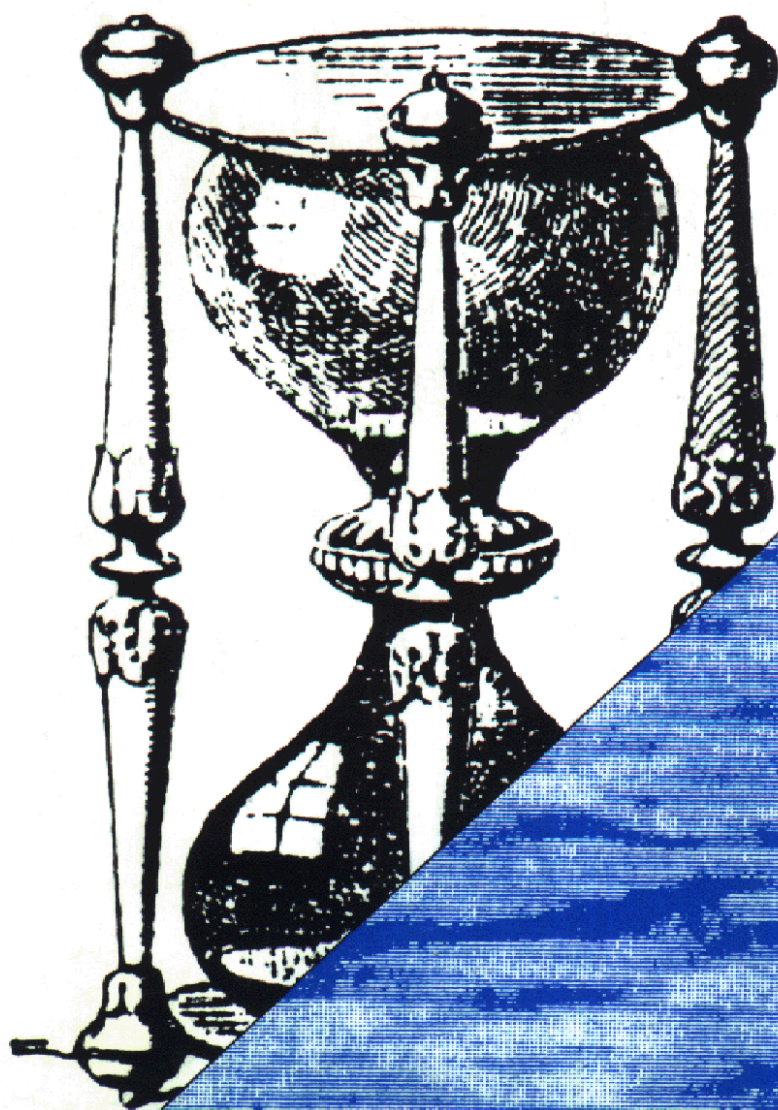
SEDIMENTATION CONTROL OF RESERVOIRS.

Guidelines.

MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES.

Recommandations.

Bulletin 67



1989

Report prepared by a Working Group
of the Committee on Sedimentation of Reservoirs
including C. Stigter, G. R. Post, D. J. Keyser and R. I. Strand
Original text in English - French translation by A. Gaillon, revised by Y. Le May

*Rapport préparé par un Groupe de Travail
du Comité de l'Alluvionnement des Retenues
comprenant C. Stigter, G. R. Post, D. J. Keyser et R. I. Strand
Texte original en anglais - Traduction en français par A. Gaillon, revue par Y. Le May*

SEDIMENTATION CONTROL OF RESERVOIRS.

Guidelines.

MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES.

Recommandations.

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 (*)
(1977-1983) (1983-1989)

The Netherlands/Pays-Bas	C. STIGTER (*) (4) (5)
Argentina/Argentine	G. A. SCARTASCINI (*)
China/Chine	DU GOHAN (*)
Egypt/Égypte	} S. SHALASH { Ab. MEGUID (*)
France	G. R. POST (*) (5)
(8) Germany (Fed. Rep.)/ Allemagne (Rép. Féd.)	H. SCHEUERLEIN (*)
India/Inde	} Y. K. MURTHY (1) { K. C. THOMAS (2) { A. CHITALE (*)
(7) Indonesia/Indonésie	W. SUDARJO (*)
Iran	} P. HARIRI { J. FARHOUDI (*)
(8) Italy/Italie	F. CAPOZZA (*)
Japan/Japon	H. TADA (*)
(6) Korea/Corée	Y. N. YOON (*)
Mexico/Mexique	} J. A. MAZA ALVAREZ { O. VEGA-ROLDAN (*)
(8) Morocco/Maroc	N. BOUTAYEB (*)
South Africa/Afrique du Sud	D. J. KEYSER (*) (3) (5)
(9) Turkey/Turquie	O. YUCEL
USA/États-Unis	} E. L. PEMBERTON { R. I. STRAND (*) (5)

(*) Committee Members in 1988/Membres du Comité en 1988

(1) Chairman/Président (1977-1978)

(2) Chairman/Président (1979)

(3) Chairman/Président (1980-1981)

(4) Chairman/Président (1983-1989)

(5) Working Group Member/Membre du Groupe de Travail

(6) Member since 1981/Membre depuis 1981

(7) Member since 1982/Membre depuis 1982

(8) Member since 1983/Membre depuis 1983

(9) Member until 1983/Membre jusqu'en 1983

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. APPORTS SOLIDES
3. DÉPÔTS SOLIDES
4. MAÎTRISE
DE L'ALLUVIONNEMENT
5. EFFETS SECONDAIRES
6. RÉFÉRENCES
7. GLOSSAIRE

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. SEDIMENT YIELD
3. SEDIMENT DEPOSITS
4. SEDIMENTATION CONTROL
5. SECONDARY EFFECTS
6. REFERENCES
7. GLOSSARY

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	11
1. INTRODUCTION	14
2. APPORTS SOLIDES	16
2.1. Mesure des apports solides	16
2.1.1. Prélèvement d'échantillons de sédiments	18
2.1.2. Levés topographiques des retenues	26
2.2. Prévision des apports solides	40
2.2.1. Évaluation des neuf facteurs influant sur les apports solides	42
2.2.2. Évaluation des équations du taux d'érosion brut	44
2.2.3. Application des équations de transport solide	44
2.2.4. Relations empiriques tirées des mesures	46
2.2.5. Modèles mathématiques	50
3. DÉPÔTS SOLIDES	54
3.1. Taux de rétention	54
3.2. Prévision des taux de consolidation des dépôts solides	56
3.3. Méthodes de prévision des formes des dépôts	62
3.4. Effet de l'alluvionnement sur le projet et la durée de vie de la retenue	70
3.5. Calcul des forces appliquées sur les ouvrages par les dépôts solides	72
3.6. Évaluation du risque au niveau des vidanges de fond	72
4. MAÎTRISE DE L'ALLUVIONNEMENT	76
4.1. Mécanisme du transport des sédiments à travers les retenues	76
4.2. Diverses mesures de maîtrise de l'alluvionnement des retenues	92
4.3. Captage des sédiments en amont des retenues	92
4.4. Dérivation des apports solides au-delà des retenues	94
4.5. Traversée des retenues par les apports solides	96
4.5.1. Introduction	96
4.5.2. Suspension par turbulence	96
4.5.3. Courants de densité	98
4.6. Chasse des dépôts accumulés dans les retenues	102
4.7. Exploitation et entretien des ouvrages d'évacuation des sédiments	108
4.8. Dragage des dépôts solides	110
5. EFFETS SECONDAIRES	114
5.1. Déformation du lit de la rivière	114
5.2. Modifications de la qualité de l'eau	120
5.3. Effets écologiques	124

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	13
1. INTRODUCTION	15
2. SEDIMENT YIELD	17
2.1. Measurement of Sediment Yields	17
2.1.1. Sediment Sampling	19
2.1.2. Reservoir Surveys	27
2.2. Prediction of Sediment Yields	41
2.2.1. Evaluation of the Nine Factors Affecting Sediment Yield	43
2.2.2. Evaluation of Gross Erosion Rate Equations	45
2.2.3. Application of Sediment Transport Equations	45
2.2.4. Empirical Relationships from Measurements	47
2.2.5. Mathematical Models	51
3. SEDIMENT DEPOSITS	55
3.1. Trap Efficiency	55
3.2. Prediction of Consolidation Rates for Deposits	57
3.3. Methods of Prediction of Deposit Shapes	63
3.4. Effect of Sediment on Design and Storage Life	71
3.5. Calculation of Forces on Structures Due to Sediment Deposits	73
3.6. Evaluation of Risk at Bottom of Outlet Structures	73
4. SEDIMENTATION CONTROL	77
4.1. Mechanics of Sediment Transport Through Reservoirs	77
4.2. Alternative Measures for Controlling Reservoir Sedimentation	93
4.3. Trapping Sediments Upstream of Reservoirs	93
4.4. Bypassing Incoming Sediments Past Reservoirs	95
4.5. Passing Incoming Sediments Through Reservoirs	97
4.5.1. Introduction	97
4.5.2. Turbulent Transport	97
4.5.3. Density Currents	99
4.6. Flushing of Accumulated Deposits From Reservoirs	103
4.7. Operation and Maintenance of Sediment Release Facilities	109
4.8. Dredging of Sediment Deposits	111
5. SECONDARY EFFECTS	115
5.1. Deformation of River Channels	115
5.2. Changes in Water Quality	121
5.3. Ecological Effects	125

5.4. Modifications du lit à l'aval du barrage	126
5.4.1. Creusement du lit	126
5.4.2. Remblaiement	138
5.5. Utilisation des sédiments évacués	138
6. RÉFÉRENCES	142
7. GLOSSAIRE	148

5.4. Downstream Channel Changes	127
5.4.1. Degradation	127
5.4.2. Aggradation	139
5.5. Disposal of Evacuated Sediment	139
6. REFERENCES	142
7. GLOSSARY	154

LISTE DES FIGURES

- Fig. 2-1. — Graphique d'évaluation des apports solides en suspension pour le fleuve San Pedro à l'aval de la rivière Aravaipa (Arizona).
- Fig. 2-2. — Emplacement des axes des profils en travers d'une retenue.
- Fig. 2-3. — Méthode d'ajustement des largeurs pour le calcul des nouvelles surfaces correspondant aux courbes de niveau entre deux profils en travers.
- Fig. 2-4. — Levé topographique par bateau, avec utilisation d'appareils électroniques.
- Fig. 2-5. — Relevé par sondage acoustique suivant un axe de profil en travers.
- Fig. 2-6. — Répartition de dépôts solides, d'après des levés topographiques de retenues.
- Fig. 2-7. — Profil des dépôts solides dans le lac Mead.
- Fig. 2-8. — Apports solides déterminés par levés topographiques de retenues situées dans des régions semi-arides des États-Unis.
- Fig. 3-1. — Courbes des taux de rétention.
- Fig. 3-2. — Graphique schématique des tranches d'une retenue et des dépôts solides.
- Fig. 3-3. — Sédiments déposés dans la tranche de crue.
- Fig. 3-4. — Courbes de calcul de la répartition des dépôts solides.
- Fig. 4-1. — Le fleuve Orange à Bethulie. Concentration moyenne journalière en sédiments en fonction du débit, 1969.
- Fig. 4-2. — Puissance moyenne du courant SV (m/s) (Retenue de Hendrik Verwoerd).
- Fig. 4-3. — Retenue Hendrik Verwoerd. Débit solide total en fonction de la distance comptée à partir du barrage.
- Fig. 4-4. — Retenue Hendrik Verwoerd. Variations de la concentration en sédiments dans le temps et l'espace.
- Fig. 4-5. — Retenue du Sautet (France). Variations de la concentration en sédiments dans le temps et l'espace.
- Fig. 4-6. — Définition schématique des courants de densité.
- Fig. 4-7. — Conditions critiques pour des sédiments sans cohésion.
- Fig. 4-8. — Modification du débit solide en fonction du temps.
- Fig. 5-1. — Formation typique d'un delta.
- Fig. 5-2. — Pente à l'extrémité amont en fonction de la pente initiale du cours d'eau.
- Fig. 5-3. — Delta de la rivière Bill Williams à son entrée dans le lac Havasu.
- Fig. 5-4. — Définition schématique d'un pavage.
- Fig. 5-5. — Étude du creusement du lit par la méthode des trois pentes.

LIST OF FIGURES

- Fig. 2-1. — Suspended sediment rating curve for San Pedro River below Aravaipa Creek, Arizona.
- Fig. 2-2. — Reservoir range line location.
- Fig. 2-3. — Width adjustment procedure for revising contour areas between range lines.
- Fig. 2-4. — Survey boat operation with electronic positioning system.
- Fig. 2-5. — Sonar sounding chart along range line.
- Fig. 2-6. — Sediment distribution from reservoir surveys.
- Fig. 2-7. — Lake Mead sediment deposition profile.
- Fig. 2-8. — Sediment yield from reservoir survey data from semiarid climate in the United States.
- Fig. 3-1. — Trap efficiency curves.
- Fig. 3-2. — Schematic diagram. Reservoir allocations, sediment deposition.
- Fig. 3-3. — Sediment deposited in flood control pool.
- Fig. 3-4. — Sediment distribution design curves.
- Fig. 4-1. — Orange River at Bethulie. Average daily sediment concentration versus discharge values, 1969.
- Fig. 4-2. — Average stream power SV (m/s) Hendrik Verwoerd Reservoir.
- Fig. 4-3. — Hendrik Verwoerd Reservoir sediment loads versus distance from dam.
- Fig. 4-4. — Hendrik Verwoerd Reservoir. Variations in sediment concentration in time and space.
- Fig. 4-5. — Variations in sediment concentration in time and space (Sautet Reservoir, France).
- Fig. 4-6. — Definition sketch density currents.
- Fig. 4-7. — Critical conditions for cohesionless sediment.
- Fig. 4-8. — Change of sediment discharge with time.
- Fig. 5-1. — Typical delta formation.
- Fig. 5-2. — Topset slope versus original stream slope.
- Fig. 5-3. — Delta of the Bill Williams Arm of Lake Havasu.
- Fig. 5-4. — Armoring definition sketch.
- Fig. 5-5. — Degraded channel by the three-slope method.



Sediment delta of the North Fork Shoshone River
in the drawdown Buffalo Bill Reservoir (Northern Wyoming, USA).

*Delta de la rivière North Fork Shoshone
dans la zone de marée de la retenue de Buffalo Bill (Nord-Wyoming, EU).*



Sediment delta of the San Juan River arm of Lake Powell
(Glen Canyon Dam) (Southern Utah, USA).

*Delta du bras de la rivière San Juan dans le lac Powell
(retenue du barrage de Glen Canyon) (Sud-Utah, EU).*

AVANT-PROPOS

Le Comité de l'Alluvionnement des Retenues a été créé à la 45^e Réunion Exécutive de la CIGB à Salzbourg (Autriche) en septembre 1977.

Les missions du Comité étaient les suivantes :

« Méthodes de prévision des apports solides du point de vue qualitatif et quantitatif.

« Méthodes d'observation et comparaison des observations avec les prévisions.

« Moyens de défense pour prolonger la vie des réservoirs (à l'exclusion de la défense et de la restauration des sols du bassin versant) : ouvrages de chasse et de prise, mode d'exploitation des retenues, dragage, pièges à sédiments. »

Les projets et la version définitive du rapport ont été préparés par un groupe de travail comprenant des représentants de la France, de l'Afrique du Sud, des États-Unis ainsi que le Président (Pays-Bas).

Le premier travail du Comité a été de mener une enquête auprès de tous les membres de la CIGB. Trente-trois Comités Nationaux ont envoyé des réponses.

Le rapport n'a pas été conçu comme un recueil d'exemples mais comme un ensemble de recommandations sur les problèmes qui se posent, avec références à diverses publications pour les détails.

Seul le contenu général des réponses au questionnaire a été utilisé pour rédiger le Bulletin, le détail devant être publié dans un document séparé.

Je tiens à remercier les membres du Comité pour leur contribution à la rédaction de ce rapport, les Comités Nationaux pour leurs réponses au questionnaire, le Secrétaire Général et son équipe pour l'excellente présentation de ce Bulletin.

C. Stigter
Président du Comité
de l'Alluvionnement des Retenues



Sediment deposits upstream the Milburn Diversion Dam
on the Middle Loup River (Central Nebraska, USA).
*Dépôts de sédiments à l'amont du barrage de dérivation de Milburn
sur la rivière Loup (Central Nebraska, EU).*

FOREWORD

The Committee on Sedimentation of Reservoirs was appointed at the 45th Executive Meeting held in Salzburg, Austria, on September 14-16, 1977.

The Terms of Reference of the Committee were as follows :

“ Methods of predicting alluvial deposits as regards quality and quantity.

“ Observation methods and comparison with predictions.

“ Means of protection to extend the life of reservoirs (excluding soil conservation and reclamation in catchment area : intake and scouring structures, operation of reservoirs, dredging, sediment trapping. ”

In order to prepare the drafts and the final report, a working group has been formed by representatives of three countries : France, South Africa, and USA and the Chairman (The Netherlands).

At the beginning of the Committee's term, a questionnaire was circulated among all ICOLD member countries. Altogether, 33 National Committees responded.

The report has not been structured as a detailed textbook with many case histories but more as a general guideline, which touches most of the problem areas concerned and refers to various publications for details.

The responses to the questionnaire have only been used in general terms for this Bulletin but are published in more detail in a separate document.

I would like to thank the members of the Committee for their valuable contributions to this report, the National Committees for responding to the questionnaires, and the Secretary General and his staff for all work done to get the Bulletin into this excellent form.

C. Stigter
Chairman, Committee on
Sedimentation of Reservoirs

1. INTRODUCTION

Toutes les retenues créées par des barrages sur des cours d'eau naturels sont plus ou moins exposées à des apports solides et à leur dépôt. Les dommages causés à l'environnement et à l'économie du projet par ces dépôts peuvent être importants et il peut s'avérer extrêmement difficile, voire même impossible, d'y remédier, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. Les présentes recommandations visent à fournir aux projeteurs et exploitants des méthodes destinées à prévoir les problèmes liés aux apports solides, à s'y adapter et à en limiter les conséquences.

Dans le cadre de ces recommandations, on s'en tient aux caractéristiques de l'alluvionnement considérées comme critiques au niveau du projet et de l'exploitation. Les éléments essentiels de toute étude d'alluvionnement comprennent le transport et le dépôt d'alluvions ainsi que le creusement du lit de la rivière. La construction d'un barrage créant une retenue peut conduire à des problèmes d'alluvionnement très complexes. Les matériaux transportés dans la retenue par le réseau hydrographique amont commencent par se déposer du fait de la réduction des vitesses. Au fur et à mesure que les sédiments se déposent, la capacité de la retenue se réduit. L'accumulation continue des sédiments entraîne une modification de la distribution des dépôts qui dépend fortement de l'exploitation de la retenue et de la cadence d'arrivée des crues. Lorsque la durée d'utilisation d'une retenue est affectée par l'alluvionnement, des modifications de l'exploitation ou d'autres mesures correctives peuvent s'avérer nécessaires. L'étude doit également considérer les effets secondaires, tels que les dépôts d'alluvions à l'amont sous forme de deltas, les modifications du lit de la rivière à l'aval du fait de l'interruption des apports solides et de l'atténuation des crues.

Ces recommandations permettront de mieux comprendre les problèmes complexes d'alluvionnement se posant aux stades de l'étude et de l'exploitation des barrages et des retenues. Elles ont été préparées par des ingénieurs du monde entier ayant de nombreuses années d'expérience dans ce domaine. Les méthodes décrites tiennent compte des connaissances actuelles et donnent de nombreuses formules empiriques déduites de mesures effectuées sur des retenues en service. L'expérience en matière d'alluvionnement des retenues s'élargissant sans cesse, les nouvelles données devraient être recueillies et analysées pour la mise à jour de ces recommandations. La perte continue de capacité de stockage de nombreuses retenues, ainsi que les changements économiques et sociaux qui modifient les besoins futurs en eau, imposeront également cette mise à jour.

Les recommandations définissent les principaux facteurs d'alluvionnement liés directement à l'étude des nouveaux barrages et retenues et à l'exploitation et l'entretien des ouvrages en service, à savoir : (1) apports solides, (2) dépôts solides, (3) maîtrise de l'alluvionnement, (4) effets secondaires. La protection des sols et la maîtrise de l'érosion dans le bassin versant sont des facteurs importants influençant les apports solides et leur dépôt, mais relèvent d'un autre domaine qui est à traiter à part.

1. INTRODUCTION

All reservoirs formed by dams on natural water courses are subject to some degree of sediment inflow and deposition. The environmental and economic damages of the accumulation of sediment in reservoirs can be enormous and may be extremely difficult or impossible to remedy, particularly in arid and semiarid regions. These guidelines are directed at providing the planner, designer, and operator of large dams and reservoirs with methods of predicting, accommodating, and alleviating the problems associated with sediment inflow to the reservoirs.

Sedimentation of reservoirs for the purpose of these guidelines covers the sedimentation characteristics considered critical in the design and operation of a dam and reservoir. The essential features of any design with regard to sediment involves the transport, deposition, and degradation processes. With construction of a dam creating an upstream reservoir, the sedimentation processes can be quite complex. Sediment transported by the upstream river system into a reservoir is first deposited because of reduced velocities. As sediment accumulates in the reservoir, storage capacity is reduced. Continuous deposition develops distribution patterns within the reservoir which are greatly influenced by both operation of the reservoir and timing of large flood inflows. When the useful life of a reservoir is affected by sediment, then either changes in operation of the reservoir or other remedial measures may be necessary. The design must also consider secondary effects such as upstream delta deposits of sediment and downstream changes to the river channel caused by interruption of sediment supplies and attenuation of floods.

These guidelines will provide a better understanding of these complex sediment problems associated with the design and operation of a dam and reservoir. They have been prepared by engineers with many years of experience in observing and preparing studies on reservoir sedimentation throughout the world. The procedures described represent the state-of-the-art with many empirical relationships developed from surveys of existing reservoirs. As more and more experience is gained on reservoir sediment problems, data should be collected and analyzed for updating these guidelines. The continued loss of storage capacity in many reservoirs, along with economic and social changes affecting future water needs, also supports the need to update these guidelines.

The guidelines define those major sediment features directly related to the design of new dams and reservoirs and operation and maintenance of existing dams and reservoirs as follows : (1) sediment yield, (2) sediment deposits, (3) sediment control, and (4) secondary effects. The protection of soils and control of erosion on the drainage area or catchment are important factors influencing the sediment yield and resulting deposits, but are considered to be another field of expertise requiring separate discussion.

2. APPORTS SOLIDES

Les sédiments pénétrant dans une retenue proviennent du bassin versant amont et sont transportés jusqu'à la retenue par les lits mineurs du réseau hydrographique. Seule une faible quantité peut provenir du bassin versant adjacent à la retenue. Les apports solides de l'ensemble du bassin versant dépendent des caractéristiques d'érosion et de transport des sédiments du bassin ainsi que des caractéristiques de transport des lits du réseau hydrographique alimentant la retenue.

Les principaux facteurs influençant les apports solides d'un bassin versant sont les suivants :

- a.* Volume et intensité des précipitations.
- b.* Géologie et type de sol.
- c.* Couverture du sol (végétation, débris et fragments de roches).
- d.* Utilisation du sol (méthodes de culture, élevage, exploitations forestières, chantiers de construction, mesures de conservation).
- e.* Géomorphologie.
- f.* Historique de l'érosion (nature du réseau de drainage, densité, pente, forme, dimensions et tracé des canaux).
- g.* Ruissellement.
- h.* Caractéristiques des sédiments (granulométrie, minéralogie, etc.).
- i.* Hydraulique du lit.

Certains spécialistes peuvent tenir compte d'autres facteurs ou faire des combinaisons des neuf facteurs précités qui sont étroitement liés. Par exemple, une végétation très dense est le signe de précipitations au moins modérées et les points *g*, *h* et *i*, peuvent être combinés pour donner une idée du transport solide.

Pour estimer les apports solides du bassin versant en amont du barrage, il faut qu'un spécialiste ayant une parfaite connaissance des problèmes d'alluvionnement effectue une reconnaissance sur le site pour déterminer l'importance de chacun des neuf facteurs influant sur les apports solides. A l'issue de ces reconnaissances, ce spécialiste rédigera un rapport décrivant les procédures recommandées, telles que (1) les mesures nécessaires à la détermination des apports solides, (2) les techniques existantes de prévision des apports solides, ou (3) la prévision des apports solides dans les bassins versants non équipés d'appareils de mesures.

2.1. MESURE DES APPORTS SOLIDES

La mesure directe des apports solides est considérée comme la méthode la plus fiable. On y procède soit en prélevant des échantillons de débit solide de la rivière, soit en effectuant un nouveau levé topographique des retenues existantes. Les données fournies par satellite peuvent servir à vérifier la validité de ces méthodes. Un des aspects importants des reconnaissances initiales du site est qu'elles permettent d'établir s'il est nécessaire de mettre en œuvre un programme de prélèvement de sédiments dans la ou les rivières se jetant dans la retenue. Il est possible de

2. SEDIMENT YIELD

Sediment inflow to a reservoir originates from the upstream drainage area and is transported into the reservoir through the main river channels. Only a small quantity may come from overland flow from the drainage area adjacent to the reservoir. The sediment yield from the entire drainage area is dependent on the sediment erosion and transporting characteristics of the area and the transporting characteristics of the river channels flowing into the reservoir.

The major factors affecting sediment yield of a drainage area are :

- a.* Rainfall amount and intensity.
- b.* Soil type.
- c.* Ground cover (vegetation, litter, and rock fragments).
- d.* Land use (cultivation practices, grazing, logging, construction activities, and conservation practices).
- e.* Topography.
- f.* Erosion history (nature of drainage network — density, slope, shape, size, and alinement of channels).
- g.* Runoff.
- h.* Sediment characteristics (grain size, mineralogy, etc.).
- i.* Channel hydraulics.

Some investigators may have either additional factors or possible combinations of the nine above which are interrelated. As an example, a heavy vegetative cover is indicative of at least a moderate amount of rainfall and items *g*, *h*, and *i* could be combined to reflect sediment transport.

In evaluating the sediment yield of the drainage area above a dam and reservoir, a field inspection by a trained sedimentation specialist is needed to determine the significance of the nine factors affecting sediment yield. Upon completion of this inspection a report by the specialist will describe recommended procedures such as (1) measurements needed to define sediment yields (2), techniques available for predicting sediment yields, or (3) predictions of sediment yields in ungaged sediment catchments.

2.1. MEASUREMENTS OF SEDIMENT YIELDS

Direct measurements of sediment yields are considered the most reliable method for determination of sediment yields. This is accomplished by either sampling the sediment load of the river or by resurveying the existing reservoirs. Data from satellite observations may be used as a further check on the validity of these methods. An important feature of the initial field inspection is an evaluation of the need to establish a sediment sampling program on the river or rivers leading

déterminer, par la même occasion, quel est l'intérêt d'un nouveau levé topographique de la retenue destiné à calculer le volume des sédiments déposés depuis le levé précédent.

2.1.1. Prélèvement d'échantillons de sédiments

L'objectif d'un programme de prélèvement de sédiments dans une rivière est de recueillir un nombre suffisant d'échantillons de transports solides par suspension ou par charriage afin de déterminer le volume total de sédiments transportés. Il est de plus absolument indispensable, au moment du prélèvement, de mesurer le débit et la température de l'eau. Le débit liquide Q_w , en m^3/s , quand il est associé à la concentration globale C , en mg/l , des sédiments en suspension, dans l'équation :

$$Q_s = 0,0864 C Q_w \quad (1)$$

donne Q_s , débit solide en suspension, en tonnes (10^3 kg) par jour.

Les appareils et techniques de prélèvement d'échantillons de débit solide en suspension varient considérablement dans le monde. La plupart des dispositifs sont conçus pour prélever un échantillon représentatif du mélange eau-sédiments. Il est important que ces échantillons soient prélevés en divers points de la largeur et de la profondeur de la rivière. Toute une série d'appareils intégrateurs ont été mis au point aux États-Unis et servent dans de nombreux pays [1] à prélever des échantillons, dans pratiquement toutes les conditions d'écoulement au moyen d'un réceptacle intérieur d'échantillons. Les normes applicables aux appareils de prélèvement d'échantillons de sédiments en suspension et aux méthodes de mesure ont été établies par l'Organisation Internationale de Normalisation [2, 3]. De nouvelles méthodes de mesure continue des concentrations de matériaux en suspension sont en cours d'essai ou d'utilisation dans différents pays du monde. Ces appareils, qui comprennent des dispositifs à source radioactive, sont bien décrits dans le compte rendu des travaux du symposium de Florence de juin 1981, « Érosion et mesure du transport solide » [4].

Le programme de prélèvement de sédiments diffère d'une rivière à l'autre, suivant les variations dans le temps du débit solide et de la granulométrie des matériaux transportés par suspension et par charriage. Les prélèvements des matériaux solides en suspension doivent être suffisamment fréquents pour que les valeurs de concentration obtenues soient significatives. Ce sont surtout les crues qui apportent la majeure partie des matériaux en suspension du fait que les valeurs de débit et de concentration en éléments solides sont particulièrement élevées. Par contre, les étiages contribuent peu, comparativement, au débit total solide en suspension, aussi peut-on faire des économies en matière de prélèvement et d'analyse d'échantillons en réduisant leur nombre pendant les périodes de basses-eaux. La fréquence des prélèvements, nécessaire à l'obtention d'une bonne mesure, varie en général d'une fois par jour dans le cas des très grands bassins versants à une fois toutes les quelques heures en période de crue dans le cas des petits bassins versants.

Le principal objectif de tout programme de prélèvement d'apports solides en suspension est de déterminer le débit solide moyen. On l'obtient souvent à l'aide d'une courbe d'évaluation des apports solides en suspension. Cette courbe, tracée sur papier logarithmique, établit la relation entre le débit liquide Q_w , en m^3/s , et le débit solide en suspension, Q_s , en tonnes par jour, donné par l'équation (1). Quand on utilise la courbe d'évaluation, on se fonde sur l'hypothèse qu'à une valeur donnée

into the reservoir. At the same time, the merits of conducting a reservoir survey for computations on volume of sediments deposited between surveys can be determined.

2.1.1. Sediment Sampling

The objective of a sediment sampling program in a river is to collect sufficient samples of sediment carried both as suspended load and as bedload to define the total sediment being transported. It is also essential at the time of sampling to measure the water discharge and water temperature. Water discharge Q_w in m^3/s when combined with an integrated suspended sediment concentration, C , in mg/l in the equation :

$$Q_s = 0.0864 C Q_w \quad (1)$$

gives Q_s , suspended sediment load in tonne (10^3 kg) per day.

Suspended sediment sampling equipment and techniques for collection differ considerably throughout the world. Most sampling devices are designed to collect a representative sample of the water-sediment mixture. It is important that these samples be integrated with width across the channel as well as with depth from water surface to the streambed. There is a series of integrating samplers developed in the United States and being used in many countries [1] to sample under almost any river condition utilizing an internal sample container. Standards for characteristics of suspended sediment samplers and methods for measurements have been issued by the International Organization for Standardization [2, 3]. New approaches for a continual monitoring of suspended sediment concentrations are being tested and used in different countries throughout the world. A good description of the samplers, which include the use of nuclear devices, is described in the IAHS Publication No. 133 " Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium " Proceedings, June 1981, Florence symposium [4].

The sediment sampling program will differ from one river to another depending on temporal variations in the sediment load and particle-size distribution of the suspended and bed material sediments. The frequency of sampling of suspended sediment should be sufficient to obtain a representative picture of significant concentration values. Flood events normally contribute the major portion of the total suspended load because both discharge and concentration values tend to be high. Base flows on the other hand contribute comparatively little to the total suspended sediment discharge, and savings in the collection and analyses of samples can be made by limiting the number of samples during periods of low flow. Typical sampling frequencies required for proper sediment monitoring vary from once daily in the case of very large catchments to once every few hours during floods in the case of small catchments.

The main objective of any suspended sediment sampling program is to determine the average sediment discharge. This is often done by means of a suspended sediment rating curve. This curve is normally a plot, on logarithmic paper, of water discharge Q_w in m^3/s , versus sediment discharge, Q_s in tonne/day, from equation 1. An inherent assumption in the use of the rating curve is that a given value of Q_w has a representative single value of Q_s . Singular relationships normally

de Q_w correspond une seule valeur de Q_s . Mais il n'existe généralement pas une relation unique entre Q_s et Q_w , en partie du fait que le transport solide par suspension est limité, c'est-à-dire que les rivières ont presque toujours l'énergie suffisante pour véhiculer les fines particules alors que le transport des particules de plus gros diamètre peut être limité par les caractéristiques hydrauliques du lit. Par conséquent, un grand nombre de points sont nécessaires pour tracer une courbe représentative. On ne peut utiliser une courbe d'évaluation des apports solides, comptant un nombre de points limité, qu'avec les données de débits qui ont permis de la construire. La Fig. 2-1 donne un exemple de deux courbes définissant la variation des débits solides en fonction des débits liquides. Il faut en général une campagne continue de prélèvement sur au moins 5 ans pour se faire une idée exacte de ce qui se produit aux différents débits du cours d'eau et pour éviter des extrapolations trop hasardeuses de la courbe. Il est toutefois possible de raccourcir la période de prélèvement si les variations de débit liquide et de débit solide sont convenablement couvertes par les mesures. Ce point est important car un seul phénomène de grande amplitude peut être équivalent à plusieurs années normales d'apports solides. Les débits peuvent parfois résulter de la fonte des neiges à une saison et du ruissellement des eaux de pluie à une autre; il faut dans ce cas deux courbes d'évaluation distinctes.

do not exist between Q_s and Q_w due in part to the fact that the wash load portion of the suspended load is availability limited, i.e., rivers almost always have the capacity to carry the fine load entering the stream while coarser particle transport may be limited by the channel hydraulics properties. Consequently, a large number of points are required to determine a representative curve. A sediment rating curve having a limited number of points should be used only with the discharge date from which it was derived. Fig. 2-1 is an example of two curves to define the variation in sediment loads occurring throughout the range in water discharge. A continuous sampling period of at least 5 years is usually needed to adequately cover the full range in water discharges and to avoid significant curve extrapolation. However, a shorter period may be possible if the range in both water and sediment discharge is adequately covered. This is important because a single large event may carry the equivalent of several normal years of sediment production. Sometimes, the discharges may be comprised of snowmelt runoff during one season and rainfall runoff during another, and two separate rating curves are required.

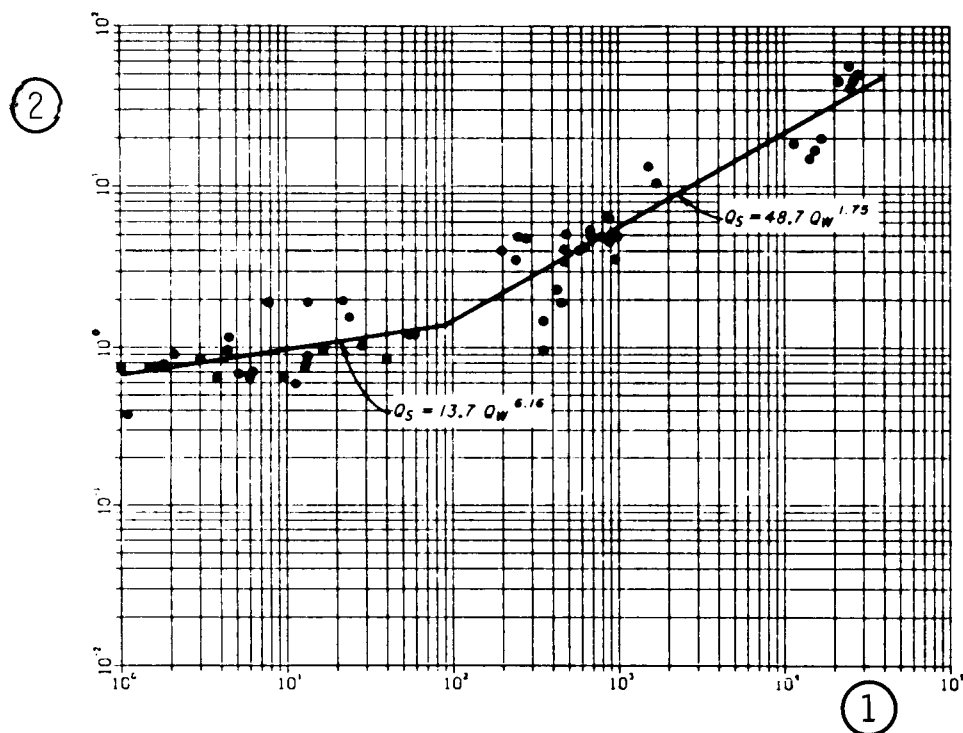


Fig. 2-1

Suspended sediment rating curve for San Pedro River below Aravaipa Creek, Arizona.

Graphique d'évaluation des apports solides en suspension pour le fleuve San Pedro à l'aval de la rivière Aravaipa (Arizona).

(1) Discharge in m^3/s .

(1) Débit en m^3/s .

(2) Sediment in tons/day.

(2) Sediment en tonnes par jour.

Les courbes d'évaluation des apports solides peuvent être rapprochées des relevés des débits liquides pour déterminer les apports solides moyens à long terme. Plus la période de relevé des débits est longue, plus les résultats sont fiables. Une technique consiste à construire, à partir des relevés effectués pendant une longue période à une station de jaugeage, une courbe des débits liquides journaliers classés. Cette courbe est en fait un graphique des fréquences cumulées qui indique pendant combien de temps, en pourcentage, le débit spécifique a été atteint ou dépassé au cours de la période des relevés. Si la courbe est représentative du débit à long terme du cours d'eau, on peut la considérer comme une courbe de probabilité et l'utiliser pour représenter les conditions futures. Suivant cette hypothèse, elle peut être associée à la courbe d'évaluation décrite par Miller [5] afin de déterminer les apports moyens à long terme de matériaux en suspension pour toute période envisagée, 100 ans par exemple.

Une autre méthode de prévision des apports solides en suspension consiste à tracer la double courbe des débits solides cumulés en fonction des débits liquides cumulés [6]. Cette méthode a l'avantage supplémentaire de montrer tout changement de tendance des apports solides et de déterminer les apports à long terme. Si les conditions sont stables, la courbe en coordonnées rectangulaires se présente comme une ligne relativement droite dont la pente est la concentration moyenne des sédiments. Tout écart sensible par rapport à une ligne droite indique un changement des caractéristiques des apports solides du bassin versant. Il faut compter au moins 5 ans de relevés continus pour qu'une estimation puisse être considérée comme fiable.

L'étude des apports solides totaux d'un bassin versant doit porter non seulement sur les débits solides en suspension mais aussi sur les débits non mesurés, ou débits solides de charriage. Lors de l'établissement d'un programme de prélèvement d'échantillons de sédiments sur un site précis, il faut examiner si des prélèvements spéciaux sont nécessaires pour définir la partie du débit solide total constituée par le débit de charriage. Les quatre méthodes les plus fréquemment employées pour déterminer cette valeur sont les suivantes : (1) une correction en pourcentage en fonction du débit solide en suspension, variant de 2 à 150 %, (2) des échantillons spéciaux prélevés sur le site, pour utilisation dans une ou plusieurs formules de transport de fond ou dans le calcul d'Einstein modifié [7], (3) des prises de transport solide de fond au moyen de pièges du type « panier », tels que les appareils de prise de Helley-Smith [8] ou d'Arnhem [1], (4) l'analyse granulométrique des sédiments déposés dans les retenues ou l'analyse des profils à découvert du sol alluvial du bassin versant.

La méthode à utiliser pour calculer le débit solide de charriage est choisie lors de l'établissement du programme de prélèvement d'échantillons de sédiments. Des indications pratiques pour les corrections relatives au débit de charriage sont données dans le Tableau 2-1, elles facilitent le choix de la méthode appropriée. Ce tableau montre que le charriage de fond est fonction de la concentration des matériaux solides en suspension, des matériaux du lit mineur et de la granulométrie des matériaux en suspension. Les conditions 1 et 2 du Tableau 2-1, avec un lit mineur constitué de sédiments de 0,062 à 2 mm de diamètre (sable), montrent que le pourcentage du débit solide de charriage peut représenter de 10 à 150 % du débit solide en suspension. Dans ces conditions, un programme de prélèvements spéciaux est à conseiller. La méthode d'Einstein modifiée, décrite par Colby et Hembree [7],

Suspended sediment rating curves can be combined with water discharge records to determine the long-term average sediment yield. The longer the period of discharge records the more reliable the results. One technique for gaging station records that cover a long period is to construct a flow-duration curve from the daily water discharges. This curve is really a cumulative frequency plot that shows the percent of time that specific discharges were equaled or exceeded for the period of record. If it is representative of the long-term flow of the stream, the curve may be considered a probability curve and used to represent future conditions. With this assumption it can be combined with the suspended sediment rating curve as described by Miller [5] to determine the long-term average suspended sediment yield for any projected period such as 100 years.

An alternative method of predicting suspended sediment yield is that of plotting the double mass curve of cumulative sediment discharge versus cumulative water discharge [6]. This method gives the added advantage of showing any change in trend of the sediment yield as well as establishing the long-term yield. If conditions are stationary, the plot on rectangular coordinates will appear as a relatively straight line, the slope of which is the average sediment concentration. Any significant deviation from a straight line indicates a change in the sediment yield characteristics of the catchment. Again, 5 years of continuous record is considered a minimum to establish a reliable estimate.

An analysis of total sediment yield for a drainage area includes, in addition to the suspended sediment, the unmeasured load or bedload. When establishing a sediment sampling program at a specific site an evaluation must be made on whether special samples are needed to determine the bedload portion of the total sediment load. The four more commonly used methods for determining the bedload portion of the total sediment load are : (1) a percent correction in terms of the suspended load varying from 2 to 150 percent; (2) special field samples for use in one or more of the reliable bedload transport equations or by a Modified Einstein computation [7]; (3) bedload samples of the basket-type traps such as the Helley-Smith [8] or Arnhem [1] samplers; and (4) analysis of gradation of sediment deposited in reservoirs or exposed alluvial soil profiles in the catchment.

The selection of the method to be used for computing bedload is made at the time the sediment sampling program is established. A convenient guideline for the bedload corrections which aids in selection of the proper methods is given in Table 2-1. This shows bedload movement is dependent upon suspended sediment concentrations, streambed material, and particle-size analysis of the suspended sediments. Conditions 1 and 2 from Table 2-1 with a streambed of sand-size sediments, 0.062 to 2.0 mm, shows that bedload could amount to from 10 to 150 percent of the suspended sediment load. Under these conditions a special sampling program is advisable. The modified Einstein procedure described by Colby

Tableau 2-1. — Correction concernant le débit de charriage.

Condition	Concentration des matériaux solides en suspension (mg/l)	Matériaux du lit mineur	Analyse granulométrique des matériaux en suspension	Pourcentage de débit solide charrié par rapport au débit solide en suspension
1 (1)	< 1 000	Sable	20 à 50 % de sable	25 à 150
2 (1)	< 1 000 à 7 500	Sable	20 à 50 % de sable	10 à 35
3	> 7 500	Sable	20 à 50 % de sable	5
4 (2)	Quelle que soit la concentration	Argile compactée, graviers, cailloux ou blocs	Faible pourcentage ≤ 25 % de sable	5 à 15
5	Quelque concentration que ce soit	Argile et silt	Pas de sable	< 2

(1) Programme de prélèvements spéciaux pour la méthode d'Einstein modifiée, nécessaire dans ces conditions.

(2) Un échantillonneur de débit de charriage, tel que celui d'Helley-Smith, peut être utilisé, ou des calculs peuvent être faits en utilisant deux ou plus des équations de débit de charriage quand le lit est constitué de graviers ou de cailloux.

est un exemple de méthode utilisant la mesure du débit solide en suspension comme base de calcul du débit solide total.

Le programme de prélèvements spéciaux qu'implique la méthode d'Einstein modifiée impose la collecte des données suivantes pendant au moins 5 à 10 campagnes couvrant les variations de débits du cours d'eau, avec le plus de crues possibles :

- Mesure des débits :
- surface du profil en travers,
 - largeur et hauteur du lit,
 - vitesse moyenne dans le lit,
 - débit du cours d'eau.

- Échantillons de sédiments :
- analyse de la concentration et de la granulométrie des échantillons de transports solides en suspension,
 - analyse granulométrique des échantillons de transports solides de fond,
 - température de l'eau.

Table 2-1. — Bedload correction

Condition	Suspended sediment concentration (mg/l)	Streambed material	Size analysis of suspended material	Percent bedload in terms of suspended load
1 (1)	< 1 000	Sand	20 to 50 percent sand	25 to 150
2 (1)	< 1 000 to 7 500	Sand	20 to 50 percent sand	10 to 35
3	> 7 500	Sand	20 to 50 percent sand	5
4 (2)	Any concentration	Compacted clay, gravel, cobbles, or boulders	Small amount up to 25 percent sand	5 to 15
5	Any concentration	Clay and silt	No sand	< 2

(1) Special sampling program for Modified Einstein computations required under these conditions.
 (2) A bedload sampler such as the Helley-Smith bedload sampler may be used or computations made by use of two or more of the bedload equations when bed material is gravel or cobble size.

and Hembree [7] is an example of a method that utilizes a measurement of the suspended load as a basis for computing the total sediment load.

The special sampling program for Modified Einstein computations requires the collection of the following data for at least 5 to 10 discharges covering the range of flows with as many higher discharges as possible :

- Discharges measurements :
- cross section area,
 - channel width and depth,
 - mean channel velocity,
 - streamflow.

- Sediment samples :
- suspended sediment samples analyzed for concentration and size distribution,
 - bed material samples analyzed for size distribution,
 - water temperature.

Si le lit est constitué de sable grossier ($> 0,5$ mm), de graviers ou de cailloux, et s'il est nécessaire de procéder à une estimation plus précise du débit de charriage, il peut être alors indispensable de prévoir un programme de prélèvements spéciaux. Celui-ci implique la mesure du débit de charriage à l'aide d'un dispositif de mesure directe, tel que l'échantillonneur d'Helley-Smith, ou le calcul du débit de charriage en utilisant au moins deux des nombreuses équations de débit de charriage dont on dispose. Des échantillons de matériaux représentatifs du lit de la rivière ainsi que les caractéristiques de la pente et de l'hydraulique du lit, pour tous les régimes de la rivière, des basses aux hautes eaux, sont nécessaires pour utiliser les équations relatives aux débits de charriage [9], telles que celles de :

Meyer-Peter, Muller [10]
Schoklitsch [11]
Ackers et White [12]
Einstein modifiée-vitesse-xi [13]
Engelund et Hansen [14]
Yang [15, 16]
Parker [17]
Laursen [18]
Bagnold [19]

Si on n'a pas recours à la méthode des pourcentages de débit de charriage du Tableau 2-1, on calcule alors le débit moyen annuel de charriage à long terme en utilisant la courbe des débits classés, le calcul étant semblable à celui effectué pour déterminer les débits solides en suspension. La courbe d'évaluation du débit de charriage peut être obtenue à partir d'un nombre limité de données, par exemple 5 à 10 calculs, si les points correspondants sont répartis sur toute la gamme des débits de la rivière.

On ajoute le débit annuel, à long terme, des matériaux en suspension au débit moyen annuel, à long terme, des matériaux charriés pour déterminer les apports solides totaux du bassin versant en amont de la station de jaugeage. Dans de nombreux cas, par exemple pour un projet de retenue, il est nécessaire de convertir en volume les débits solides en masse mesurés à une station de jaugeage. On y parvient en déterminant la granulométrie de la totalité des apports solides et en calculant la masse volumique des dépôts solides à partir des relations empiriques établies au moyen des données recueillies dans des retenues actuelles [20]. Les données à utiliser pour ces calculs de masse volumique sont fournies par des analyses granulométriques de prélèvements de sédiments en suspension sélectionnés. Pour déterminer correctement la granulométrie des sédiments pénétrant dans la retenue, il faut procéder en général aux analyses granulométriques de 10 à 15 échantillons de matériaux solides en suspension par an, prélevés dans toutes les conditions de débit de la rivière, ces analyses s'ajoutant à celles portant sur le charriage de fond.

2.1.2. Levés topographiques des retenues

La mesure de l'accumulation de sédiments dans une retenue est considérée par de nombreux ingénieurs comme la meilleure méthode de détermination des apports solides. Les levés topographiques de retenues existantes, pour déterminer la capacité de stockage perdue et la répartition des dépôts solides, fournit des informations sur le taux d'apports solides et des renseignements utiles à l'exploitation de la retenue.

If the bed material is coarse sand > 0.5 mm, gravel- or cobble-size material and a more accurate estimate of bedload is necessary, then a special sampling program may be needed. This involves measuring the bedload by a direct measuring sampler such as the Helley-Smith or computing the bedload by using two or more of the many available bedload equations. Bed material samples representing the bed of the stream along with the channel slope and channel hydraulics for a range of discharges from low to high are needed for use in bed material and bedload equations [9], such as :

- Meyer-Peter, Muller [10]
- Schoklitsch [11]
- Ackers and White [12]
- Velocity - xi Adjustment to Einstein [13]
- Engelund and Hansen [14]
- Yang [15, 16]
- Parker [17]
- Laursen [18]
- Bagnold [19]

If the bedload percentage method is not used from Table 2-1 then the long-term average annual bedload is computed by using the flow-duration curve in a computation similar to that used for computing suspended sediment. The bedload rating curve can be developed by a limited number of data points such as 5 to 10 computations if they are distributed throughout the range in discharges.

The long-term annual suspended sediment load is added to the long-term average annual bedload to determine the total sediment yield for the drainage area above the measuring station. In many situations, such as for a proposed reservoir, there is a need to convert the sediment loads at a gaging station from a mass to a volume. This is done by determining the particle-size distribution of total sediment inflow and computing the density of deposited sediments using empirically developed relationships from data collected on existing reservoirs [20]. Data to be used in these density computations consist of particle-size analyses of selected suspended sediment samples. It usually takes from 10 to 15 suspended sediment samples per year covering a range in water discharge to be analyzed for particle-size distribution in addition to the bed material-size analyses to determine a representative-size distribution of incoming sediments.

2.1.2. Reservoir Surveys

Measurement of the sediment accumulation in a reservoir is considered by many engineers as the best method for determining the sediment yield. Surveys of existing reservoirs for determining loss of storage space and distribution of sediment deposits within the reservoir provide data on sediment yield rates as well as for operations purposes. It is important that when construction is completed on a dam,

Il est important d'établir, à l'achèvement de la construction du barrage, un programme de levés topographiques ou d'observations de l'alluvionnement de la retenue. Avant même que la construction du barrage soit terminée, il faut choisir la méthode de base pour les levés futurs et la technique d'analyse des dépôts solides.

Les deux méthodes topographiques de mesures comparatives utilisées le plus couramment pour les grandes retenues sont : (1) la méthode des courbes de niveau, (2) la méthode des profils en travers. La méthode choisie dépendra généralement des levés initiaux, de l'exploitation et des dimensions de la retenue, et de la précision souhaitée des calculs de modification de la capacité de stockage. Le calcul effectif du volume des dépôts solides s'effectue en comparant les capacités de stockage entre deux levés topographiques.

Méthode des courbes de niveau

Le levé topographique initial de la plupart des retenues fournit une carte hypsométrique de la zone de la retenue dont les lignes de niveau sont en général espacées de 1 à 5 mètres environ. Pour les levés topographiques des retenues existantes, la réalisation d'une nouvelle carte hypsométrique se limite généralement aux petites retenues ou à celles dont le plan d'eau peut être abaissé occasionnellement à un niveau très bas. Le coût de réalisation d'une carte bathymétrique complète ou du tracé de courbes de niveau au dessous de la surface du plan d'eau est généralement prohibitif, sauf pour les très petites retenues. S'il est possible d'abaisser à un niveau bas le plan d'eau d'une retenue, on peut en effectuer le levé suivant une des méthodes topographiques classiques ou par photogrammétrie. On dresse maintenant la carte d'un grand nombre de retenues suivant la méthode des courbes de niveau en raison du perfectionnement des appareils topographiques et photographiques. A partir d'un nombre limité de repères au sol relevés topographiquement puis exploités pour une identification photographique, on dresse une nouvelle carte hypsométrique. Si la retenue n'est pas entièrement vidée, on effectue le levé bathymétrique de la tranche restant sous l'eau pour compléter la topographie de la tranche émergée et obtenir ainsi une carte hypsométrique complète de la retenue.

Méthode des profils en travers

La majorité des retenues de moyennes ou grandes dimensions font l'objet de levés bathymétriques ou de mesures par sondages subaquatiques le long de l'axe d'un profil en travers. Une série d'axes de profils en travers sont identifiés sur la carte hypsométrique initiale, afin de couvrir entièrement la superficie de la retenue; ils sont généralement établis avant remplissage de la retenue. Des repères fixes sont positionnés aux extrémités de chaque axe et un levé initial est effectué au droit de chaque profil en travers avant remplissage de la retenue ou au moment de la construction du barrage. Un plan type, montrant la position des axes des profils en travers et des repères d'extrémité, est représenté sur la Fig. 2-2.

Le principal objectif de la méthode des profils en travers utilisée pour le calcul de la variation du volume de stockage entre deux campagnes de mesures est la comparaison des variations enregistrées sur chacun des profils. Les variations constatées sur les profils du fait du dépôt de sédiments sont considérées comme représentatives des variations survenues entre les profils. La méthode mise au point par le Bureau of Reclamation (USBR) et décrite par Pemberton [21] comporte

a plan be established for surveying or monitoring of the sediment accumulation. Even before construction of the dam is completed, a decision is needed on the basic method selected for future surveys and technique for analyzing sediment accumulation.

The two more common survey comparison methods for large reservoirs are either the (1) contour method or (2) range-line method. The method selected will usually depend on original survey data, operation of the reservoir, size of reservoir, and accuracy for computations of changes in storage volume. The actual computations of volume of sediment accumulation are made by comparison of storage volumes between two surveys.

Contour Method

The original survey for most reservoirs provided a contour map of the reservoir area with contour intervals usually varying from about 1 to 5 meters. For surveying existing reservoirs, the development of a new contour map is usually limited to only small reservoirs or to reservoirs that may occasionally be emptied to a very low reservoir stage. The cost of developing a complete bathymetric or underwater contour map is usually prohibitive except for very small reservoirs. If a reservoir can be drawn down to low stage, it can be surveyed by either conventional land survey procedures or by photogrammetric methods. Many reservoirs are now being mapped by the contour method because of the development of more sophisticated land surveying and photographic equipment. With a limited number of ground control points to be surveyed by land surveying methods and then paneled for photographic identification, a new contour map is developed. If a reservoir is not completely emptied, a bathymetric survey is made of the underwater section to supplement the above-water topography in drawing a complete reservoir contour map.

Range-Line Method

Most medium to large reservoirs are surveyed by bathymetric surveys or underwater soundings made along a specified range line. A series of range lines are identified on the original contour map to completely cover the reservoir area and are usually established before filling of the reservoir. Permanent markers located at the end of each range and an original profile or survey is made of the range line prior to filling or at the time of construction of the dam. A typical map showing locations of ranges and range end markers is shown in Fig. 2-2.

The main objective in the range line method for computing changes in storage volumes between any two surveys is to make a comparison of changes at each range line. The changes that occur at a range line due to sediment deposition are assumed to be representative of changes between range lines. The method developed by the Bureau of Reclamation and described by Pemberton [21] involves making an adjustment of the original contour area between any two ranges by applying the rate

l'ajustement de la superficie correspondant à la ligne de niveau initiale, entre deux axes de profils en travers, par application du coefficient de modification de largeur au droit d'un axe amont et d'un axe aval. Un schéma illustrant cette méthode est représenté sur la Fig. 2-3.

Méthodes topographiques

La qualité des mesures topographiques est primordiale si on veut être assuré que les mesures du volume de matériaux déposés dans la retenue entre deux observations sont dignes de confiance. Une bonne préparation des travaux à effectuer sur le terrain et l'utilisation d'un matériel topographique approprié sont des éléments de première importance. Une fois la décision prise de recourir à la méthode des courbes de niveau ou à celle des profils en travers, il faut se préoccuper des appareils et du personnel à mettre en œuvre, dès le stade préparatoire. Si on envisage de recourir à la photogrammétrie, on peut avoir besoin d'informations différentes sur le site.

Bien souvent, le levé topographique complet de la retenue, y compris les levés sur le terrain et les relevés bathymétriques, est sous-traité à des entreprises spécialisées. Dans ce cas, tous les aspects des travaux à effectuer doivent faire l'objet d'un accord avant le début des opérations. Il est important, quand on analyse ou compare les données de deux opérations topographiques faites à des périodes différentes, de bien comprendre en quoi elles sont comparables et fiables.

Un point important à vérifier, au stade de la préparation des mesures, est l'éventualité d'un affaissement ou d'une déformation de la cuvette de la retenue. Cette déformation peut être due à la masse de l'eau stockée dans la retenue ou à une autre activité géologique dans la région. Un soulèvement consécutif à un affaissement initial a également été enregistré [22]; en conséquence, le canevas altimétrique de la retenue doit être vérifié lors de chaque nouveau levé. Un changement mineur de point de référence peut affecter considérablement la détermination de la nouvelle capacité de la retenue.

Pour faire le levé topographique d'une retenue remplie partiellement ou en totalité, il faut disposer d'une embarcation. Un appareillage de sondage acoustique est utilisé pour la plupart des levés bathymétriques car il permet d'obtenir un enregistrement ou un tracé continu du fond de la retenue à mesure que l'embarcation se déplace le long d'un axe de référence prédéterminé. Quand on effectue de nouveaux levés avec des sondeurs acoustiques et qu'on les compare à des levés antérieurs faits avec un appareillage de sondage d'un type plus ancien, il est important d'étalonner les sondeurs. On y parvient en les ajustant de façon à obtenir la même définition du niveau du lit. Pour la mesure sur un axe de référence, l'embarcation se déplace d'un bord à l'autre de la retenue à une vitesse pratiquement constante de 2 à 5 nœuds. Différentes méthodes de détermination de la position de l'embarcation à mesure qu'elle se déplace sur la retenue sont utilisées, par exemple : le procédé topographique classique de triangulation, des procédés mécaniques tels que le fil ou le câble étalonné, ou des systèmes électroniques plus complexes de mesures de distances. C'est à ces derniers systèmes qu'on a de plus en plus recours désormais car ils permettent de recueillir davantage de données en un temps plus court. La Fig. 2-4 représente un schéma de levés effectués à l'aide d'une embarcation et d'un système électronique, et la Fig. 2-5 un exemple de relevé par sondage.

of change in width at an upstream and downstream range. A sketch illustrating this approach to develop a new contour area based on change in width from the range lines is shown in Fig. 2-3.

Surveying Procedures

The quality of a reservoir survey is a critical factor in assuming the reliability of the volume of measured sediment deposited between any two surveys. Adequate planning for the field work and securing the proper survey equipment are important features. Once the method is selected for either a contour or range-line method of survey, then the equipment and personnel requirements must be considered in the planning process. If photogrammetric methods are included, then changes may be necessary in field data requirements.

Quite often the complete reservoir survey, including the land survey and bathymetric survey, is contracted to firms specializing in this work. In these situations all aspects of the job should be agreed upon before conducting the survey. It is important in analyzing or comparing the data from any two surveys that the comparability and reliability of either survey be understood.

An important consideration at the time of survey preparation is to check the possibility of subsidence or crustal deformation in the reservoir basin. This deformation may be caused by the weight of water that is stored in the reservoir or by other regional geologic activity. Rebound following initial subsidence has also been recorded [22]; consequently, the reservoir vertical control network should be verified at the time of each resurvey. A minor datum change could significantly effect the new capacity derivation.

Surveying a partially or completely filled reservoir requires some type of boat or raft. Sonic sounding equipment is being used for most surveys because it provides a continuous record or chart of the reservoir bottom as the boat moves along a preestablished range line. When resurveys done with sonic sounders are to be compared with those done with earlier types of sounding equipment, it is important to calibrate the sonic equipment. This is done by setting the sonic equipment so that the same definition of " bed " level is obtained. In surveying a range line, the boat moves from near shore on one end to the opposite shore at a near constant speed of 2 to 5 knots. Various methods for positioning the boat as it moves across the reservoir are being used such as : " cutting in " by standard land survey methods, mechanical methods such as wire or calibrated cable, or sophisticated electronic distance measuring systems. The electronic measuring systems are becoming more prevalent because of the ease in collecting more data and savings in time involved in conducting the survey. A typical layout for a boat using the electronic system is shown in Fig. 2-4, and an example of the sounding chart is shown in Fig. 2-5.

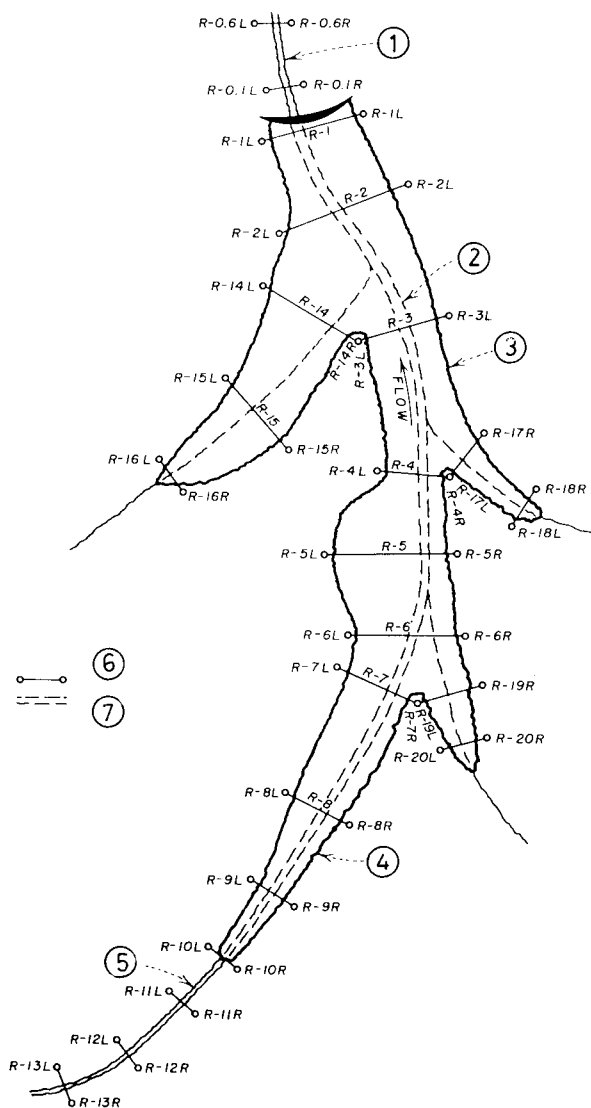


Fig. 2-2

Reservoir range line location.

Emplacement des axes des profils en travers d'une retenue.

- | | |
|--|---|
| (1) Channel downstream from dam. | (1) Lit à l'aval du barrage. |
| (2) Former River Channel. | (2) Ancien lit de la rivière. |
| (3) Reservoir Boundary for normal maximum water surface elevation. | (2) Rives de la retenue pour le niveau maximal normal de l'eau. |
| (4) Delta Area of Reservoir. | (4) Delta de la retenue. |
| (5) Channel upstream from Reservoir. | (5) Lit à l'amont de la retenue. |
| (6) Sediment range. | (6) Profils en travers pour contrôle des sédiments. |
| (7) Submerged Channel. | (7) Lit submergé. |

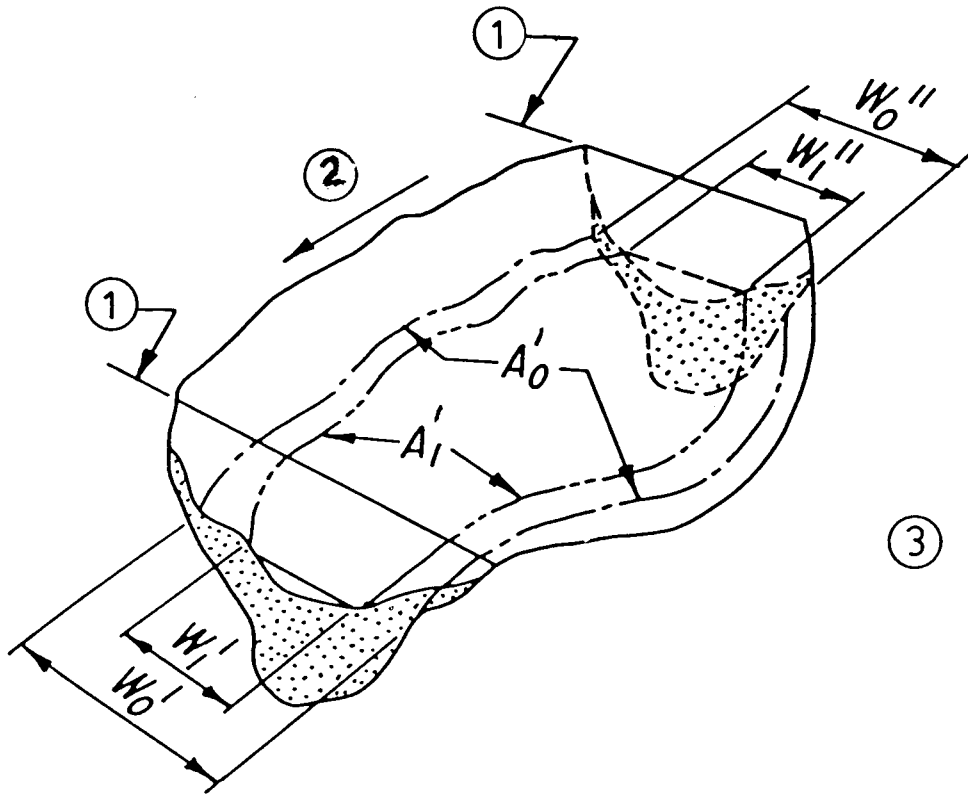


Fig. 2-3

Width adjustment procedure for revising contour areas between range lines.

Méthode d'ajustement des largeurs pour le calcul des nouvelles surfaces correspondant aux courbes de niveau entre deux profils en travers.

(1) Sediment ranges.

(2) Flow.

(3) Schematic Segment of Reservoir.

Initial Survey.

A_0 : Contour area.

W_0 : Downstream Width.

W_0'' : Upstream Width.

New Survey.

A_1 : Contour Area (Computed).

W_1 : Downstream Width.

W_1'' : Upstream Width.

(1) Profils en travers.

(2) Écoulement.

(3) Schéma d'une portion de retenue.

Topographie initiale.

A_0 : Surface à l'intérieur de la courbe de niveau.

W_0 : Largeur aval.

W_0'' : Largeur amont.

Nouvelle topographie.

A_1 : Surface à l'intérieur de la courbe de niveau (calculée).

W_1 : Largeur aval.

W_1'' : Largeur amont.

$$A_1 = A_0 \left(\frac{\frac{W_1 + W_1''}{2}}{\frac{W_0 + W_0''}{2}} \right)$$

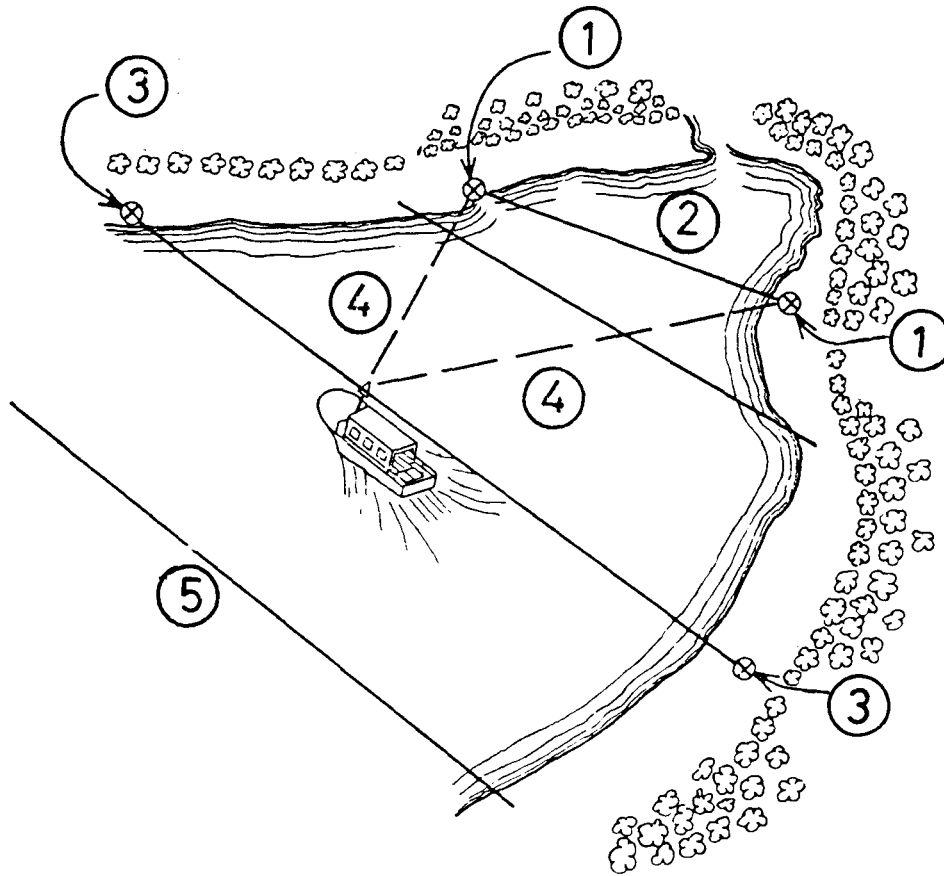


Fig. 2-4

Survey boat operation with electronic positioning system.

Levé topographique par bateau, avec utilisation d'appareils électroniques.

- | | |
|--|---|
| (1) Shore Station (known coordinates). | (1) Station sur la rive (de coordonnées connues). |
| (2) Base line. | (2) Base. |
| (3) End Station (known coordinates). | (3) Station d'extrémité (de coordonnées connues). |
| (4) Range. | (4) Axe de visée. |
| (5) Pre determined ranges. | (5) Axe de visée pré-déterminé. |

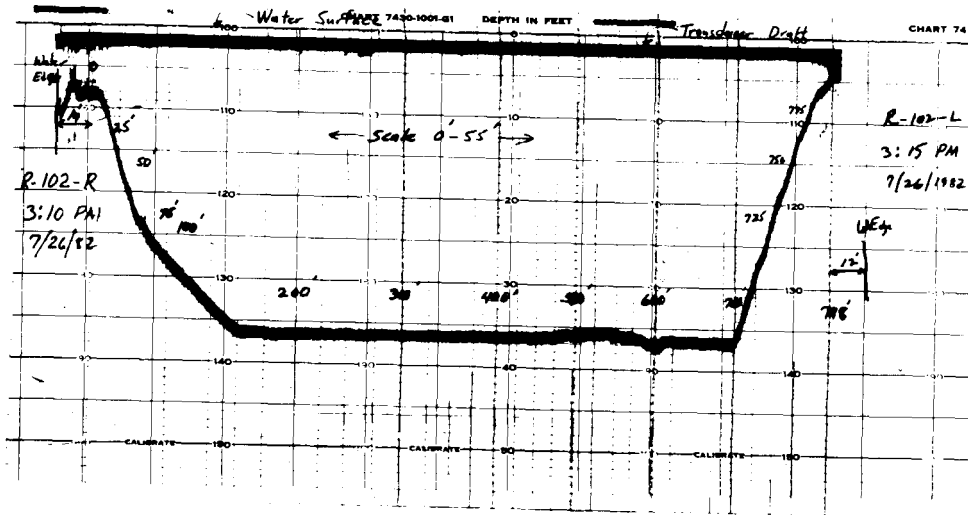


Fig. 2-5

Sonar sounding chart along range line.

Relevé par sondage acoustique suivant un axe de profil en travers.

De récents travaux de recherche et de développement dans le domaine de la technologie du laser peuvent bientôt déboucher sur de nouvelles technologies de levés aériens des retenues.

Analyse des données fournies par le levé topographique des retenues

Le levé topographique d'une retenue a pour principal objectif la détermination de sa capacité de stockage au moment de la mesure ce qui, par comparaison avec une mesure antérieure (généralement la mesure topographique initiale), donne le volume de sédiments accumulés. Le calcul du volume stocké dans la retenue s'effectue généralement à partir des cartes hypsométriques en utilisant la méthode de la superficie moyenne du contour de la retenue ou l'une de ses variantes telle que la « Loi Prismoïdale Modifiée » ou la Loi de Simpson. La superficie correspondant à chacune des courbes de niveau de la carte est déterminée par planimétrie, ce qui permet de calculer le volume de chaque tranche et d'obtenir ainsi la capacité totale de stockage de la retenue. Cette opération s'effectue lors du levé topographique initial de la retenue et pour toutes les mesures ultérieures si la méthode des courbes de niveau est choisie. En cas d'utilisation de la méthode des profils en travers pour les nouvelles mesures topographiques, il faut prévoir une opération supplémentaire pour obtenir les superficies des contours de la retenue. Les superficies des nouveaux contours de la retenue sont généralement calculées suivant la méthode d'ajustement des largeurs illustrée par la Fig. 2-3. Les calculs de superficie et de capacité d'une retenue aboutissent au tracé d'un graphique définissant la superficie et la capacité de la retenue correspondant au levé topographique initial et aux levés postérieurs. On peut trouver des exemples de tels graphiques dans des rapports sur de nouveaux levés topographiques, par exemple dans le rapport de Lara et Sanders [22].

La comparaison des capacités entre deux levés topographiques permet de mesurer le volume des sédiments accumulés. Pour ce calcul, il est important que la méthode retenue pour déterminer la capacité de la retenue à partir des superficies correspondant aux courbes de niveau soit la même pour les deux niveaux à comparer. En d'autres termes, si on a utilisé pour le calcul de la capacité initiale de la retenue la « Loi Prismoïdale Modifiée » ou l'un des systèmes de mesures électroniques, il faut également l'employer pour le calcul de la nouvelle capacité. On s'assure ainsi que le calcul du volume des sédiments ne sera pas faussé par des différences de technique.

Des levés topographiques ont permis d'autres analyses intéressantes sur l'alluvionnement des retenues, consistant à tracer la courbe profondeur de la retenue (en pourcentage) en fonction du dépôt solide (en pourcentage), ou la courbe du profil des dépôts solides dans l'axe longitudinal de la retenue. La courbe hauteur de la retenue (en pourcentage) en fonction du dépôt solide (en pourcentage) (Fig. 2-6) est utilisée pour construire des courbes de calcul destinées à prévoir, lors d'études de projets, la répartition des dépôts solides dans les retenues. L'autre courbe, ou profil des dépôts solides, fournit des informations intéressantes permettant de définir le delta, les pentes de la couche frontale pour d'éventuels courants de densité et la hauteur des dépôts solides au pied du barrage. Un exemple de représentation non dimensionnelle du profil des dépôts de sédiments du lac Mead est donné à la Fig. 2-7.

Recent research and development in the area of laser technology may soon create new techniques of reservoir survey from the air.

Analysis of Reservoir Survey Data

The main purpose of a reservoir survey is to determine the storage capacity at the time of the survey, which, when compared to an earlier survey (usually the original survey), gives the sediment storage capacity. The storage volume computations are usually made from the topographic contour maps using an average contour area method or some modifications such as the Modified Prismoidal Rule or Simpson's Rule. The areas for each contour on the map are planimeted for incremental capacity computations and summed for total reservoir capacity. This is done for the original survey and is also applied to the new surveys if the contour method was selected. For those situations where the range-line method was used in the new survey, an extra step is needed to develop the contour areas. The new contour areas are usually computed by the width adjustment procedure illustrated in Fig. 2-3. The end product to the area capacity computations is the plot of the areas and capacities for the original and new surveys. Examples of these plots may be found in reservoir resurvey reports such as Lara and Sanders [22].

A comparison of capacities between the two surveys gives the measured volume of sediment accumulation. It is important in this sediment volume computation that the method selected to compute capacities from contour areas be the same for both of the surveys being compared. That is, if the Modified Prismoidal Rule or one of the electronic computer methods are used for computing the original reservoir capacity, whichever is used, should also be used for the new survey capacity computations. This would help eliminate any differences in technique having undue influence on the sediment volume computations.

Other worthwhile analyses of data from reservoir sedimentation surveys are to make a plot of percent reservoir depth versus percent sediment deposit or to plot a sediment deposition profile throughout the length of the reservoir. The plot of percent depth versus percent sediment (Fig. 2-6) has been used in developing design curves in predicting the distribution of sediment deposits in planning studies. The other plot or deposition profile provides valuable information for defining the delta, foreset slopes for possible density currents, and depth of sediment depositions at the dam. An example of a dimensionless plot of a sediment deposition profile for lake Mead is shown in Fig. 2-7.

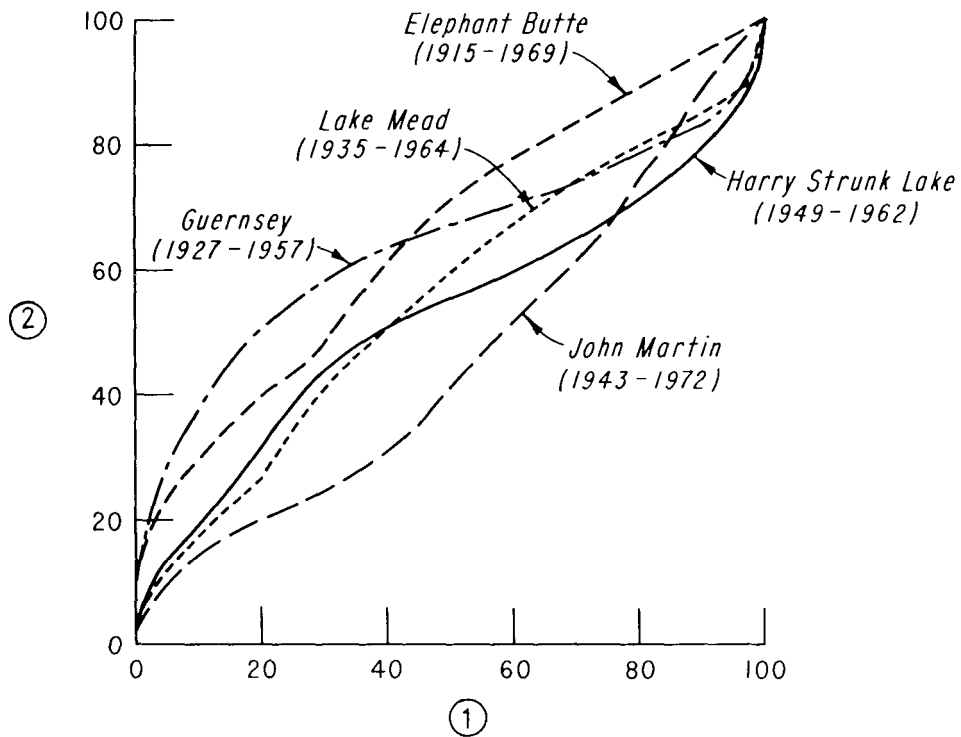


Fig. 2-6

Sediment distribution from reservoir surveys.

Répartition de dépôts solides, d'après des levés topographiques de retenues.

(1) Percent sediment deposited.

(1) *Pourcentage de sédiments déposés.*

(2) Percent depth.

(2) *Pourcentage de profondeur.*

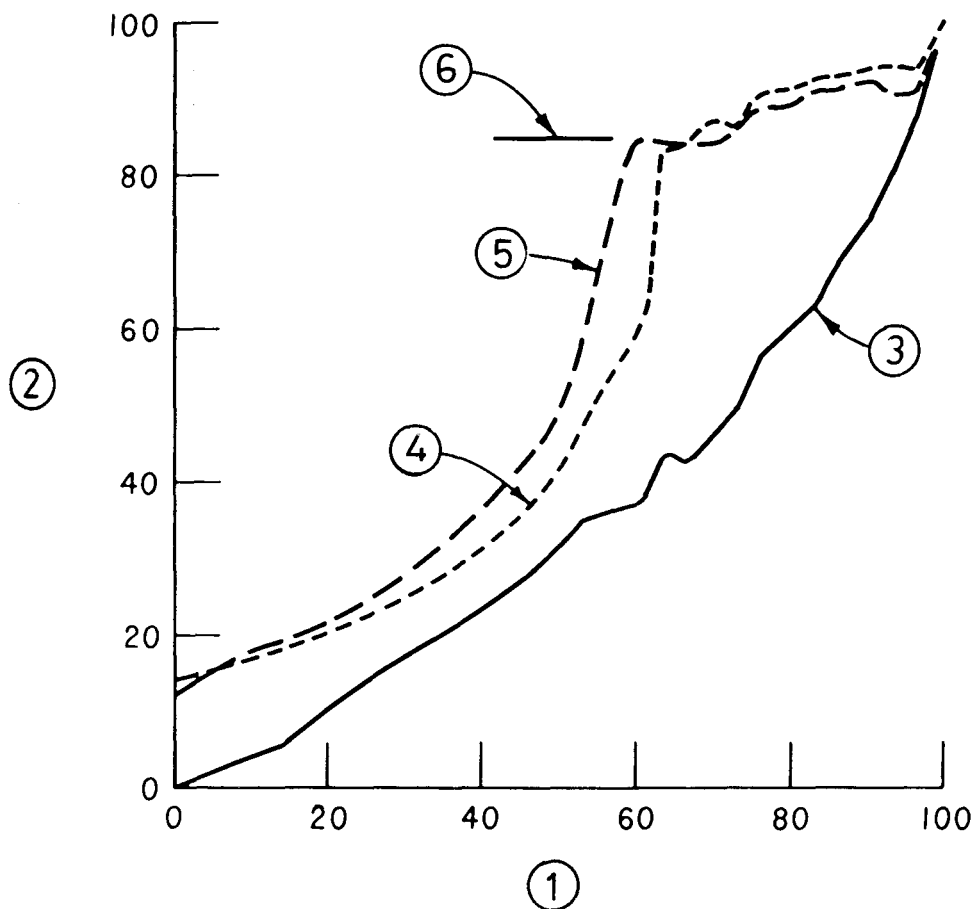


Fig. 2-7

Lake Mead sediment deposition profile.

Profil des dépôts solides dans le lac Mead.

(1) Percent distance (D) (Dam to Top Operation Pool).

Total Distance D = 195 kilometers.

(2) Percent Depth (H) - Total Depth H = 177 meters.

(3) (4) (5) : 1935 (original), 1949, 1964.

(6) 50 % Pool Elev. (1935-1964).

(1) Distance (en pourcentage) depuis le barrage.

Distance totale D = 195 kilomètres.

(2) Profondeur (en pourcentage) - Profondeur totale = 177 mètres.

(3) (4) (5) : 1935 (origine), 1949, 1964.

(6) Niveau moyen d'exploitation de 1935 à 1964.

Prélèvement d'échantillons de dépôts solides

Lors de l'étude de la retenue, on a également besoin d'informations sur les caractéristiques des sédiments déposés ou en mouvement dans la retenue. Les échantillons prélevés doivent être convenablement répartis sur toute la superficie de la retenue. L'analyse des échantillons prélevés comporte la détermination de leurs masse volumique, granulométrie, résistance au cisaillement et composition minéralogique. Ces données sur les sédiments déposés servent à mieux comprendre l'origine des apports solides, à étudier les courants de densité ou les possibilités de chasse des sédiments à travers les ouvrages d'évacuation, à vérifier les modèles réalisés pour étudier le mouvement des sédiments dans les retenues, et à mettre au point des formules empiriques destinées à être utilisées dans l'étude et le projet d'autres retenues. En outre, les données relatives aux caractéristiques des sédiments, quand on les rapproche des renseignements fournis par les mesures des hauteurs de sédiments à proximité du barrage, permettent d'attirer l'attention sur d'éventuels problèmes d'alluvionnement, tels que la pénétration de dépôts solides dans les prises d'eau de la centrale ou l'obturation des ouvrages de vidange.

Des données sur les sédiments franchissant un barrage peuvent attirer l'attention sur des problèmes futurs liés au mouvement des sédiments dans des courants très rapides et turbulents, pouvant entraîner la modification de l'exploitation d'une retenue. Les mêmes données fournissent des informations sur le taux d'alluvionnement de la retenue et aident ainsi à détecter des problèmes d'exploitation; ces données seront également utiles pour les études d'autres retenues. La mesure des sédiments franchissant le barrage peut s'effectuer soit par des prélèvements d'échantillons de débits solides en suspension dans la rivière, en aval du barrage, soit par des prélèvements de débits passant dans les évacuateurs de crue, les vidanges de fond ou les ouvrages de prise d'eau.

Le matériel de prélèvement d'échantillons de sédiments dans les retenues est très varié. Dans les tronçons supérieurs de la retenue, au niveau du barrage ou dans le lit en aval du barrage, le matériel peut être identique à celui utilisé pour prélever des échantillons dans la rivière, en amont de la retenue, à savoir des échantillonneurs classiques de débit de charriage et de débit en suspension. En eaux profondes, on peut avoir recours, pour prélever des échantillons de dépôts solides destinés à déterminer la masse volumique, la granulométrie ou la composition minéralogique, à des échantillonneurs du type carottier, à piston ou à gravité. Pour déterminer la masse volumique des sédiments, des mesures *in situ* peuvent aussi être effectuées au moyen d'un nucléodensimètre.

2.2. PRÉVISION DES APPORTS SOLIDES

La plupart des méthodes de prévision des apports solides se fondent, soit directement, soit indirectement, sur les résultats des mesures par prélèvement d'échantillons, ou sur les levés topographiques des retenues, comme décrit au paragraphe 2.1 intitulé « Mesure des apports solides ». La ou les méthodes utilisées pour prévoir les apports solides d'un bassin versant donné dépendent de l'évaluation faite par un spécialiste en alluvionnement après reconnaissances sur le site et examen approfondi de toutes les données disponibles. Les neuf facteurs influant sur les apports solides d'un bassin versant, énumérés au début du chapitre 2, doivent être analysés par le spécialiste qui peut ainsi retenir la méthode de prévision la plus appropriée au bassin versant en question.

Deposited Sediment Sampling

At the time of the reservoir survey, data are also needed on some of the characteristics of the sediments both as deposited and moving through the reservoir. Samples of deposited sediments are needed ideally spaced through the reservoir area. Analysis of the samples collected consists of density, particle size distribution, shear strength, and mineralogic composition. These data on deposited sediments are used for a better understanding as to the source of incoming sediments, for use in study of density currents or study of sluicing capabilities through outlet works, for verification of models being developed on movement of sediment through reservoirs, and for development of empirical relationships to be used in the planning and design of other reservoirs. In addition to the above uses, data on sediment characteristics when combined with survey data on depths of sediment near the dam can be used to identify future problems of sediment deposition associated with inflow to powerplant intakes or plugging of outlet works.

Data on sediment transported through a dam can be used to project future problems associated with sediment movement under high velocity and turbulent conditions which could result in changes in operation of a reservoir. The same data will give information on reservoir trap efficiency that will help identify any operational problems as well as provide data for planning on other reservoirs. Measurement of sediment passing through the dam can be either sampling of suspended sediment in the river below the dam or sampling discharges through the spillway, bottom outlets, or at the intake structure.

The equipment for collecting sediment samples in a reservoir is quite varied. In the upper reaches of the reservoir, at the dam, or in the channel below the dam, it may be the same as used for upstream river sampling with standard suspended and bed material samples. In the deep water, samples of deposited sediments, either a piston or gravity core sampler can be used to collect samples for density, particle size, or mineralogy analysis. For density measurements, "in situ" measurements can be obtained by use of a radioactive sediment density probe.

2.2. PREDICTION OF SEDIMENT YIELDS

Most methods for predicting sediment yields are either directly or indirectly based on the results of measurements of sediment yield from sediment sampling or on reservoir surveys as described in section 2.1., Measurements of Sediment Yields. The method or methods to be used in predicting sediment yields for a given drainage basin depends on evaluation made by a sedimentation specialist after a field inspection and thorough examination of all available data. The same nine factors affecting sediment yield as described in the beginning of section 2, must be analyzed by the specialist in selection of the predictive method most applicable to the specific drainage area.

Les apports solides des bassins versants peuvent être prévus suivant cinq méthodes différentes, utilisables principalement au stade des études du projet du barrage et de la retenue. Une ou plusieurs de ces méthodes peuvent être aussi appliquées à des retenues existantes pour lesquelles on ne peut envisager des mesures directes qui prendraient trop de temps ou coûteraient trop cher. Les cinq méthodes de prévision sont les suivantes :

1. Évaluation des neuf facteurs influant sur les apports solides.
2. Évaluation des équations du taux d'érosion brut.
3. Application des équations de transport solide.
4. Relations empiriques découlant des mesures.
5. Modèles mathématiques.

Le choix de la méthode appropriée dépend du type de l'étude, des détails nécessaires, du coût de l'étude, de la fiabilité et de l'applicabilité de la méthode au bassin versant. Les paragraphes qui suivent décrivent ces différentes méthodes, avec leurs avantages et inconvénients.

2.2.1. Évaluation des neuf facteurs influant sur les apports solides

Cette méthode demande beaucoup de bon sens et d'expérience pour établir une relation entre tous les facteurs contribuant à l'érosion et au transport solide d'un bassin versant. Il faut en premier lieu qu'un spécialiste en alluvionnement effectue une reconnaissance sur le site pour évaluer les différents facteurs et déterminer un taux d'apports solides, généralement en tonnes par kilomètre carré et par an. La plupart des spécialistes se fondent largement sur la comparaison des facteurs d'érosion ou de production de sédiments avec des conditions similaires enregistrées dans d'autres bassins versants où des mesures ont été effectivement faites, soit par des prélèvements d'échantillons, soit par des levés topographiques de la retenue. Seule l'expérience permet de garantir une certaine fiabilité à cette comparaison.

Un bon exemple d'application de ce type de procédé est décrit dans le rapport du Pacific Southwest Interagency Committee (États-Unis) d'octobre 1968 [23]. Le Tableau 2-2 indique les facteurs influant sur le taux d'apports solides et le système

Tableau 2-2. — Poids des facteurs influant sur le taux d'apports solides.

Facteurs	Taux d'apports solides		
	Élevé	Moyen	Faible
<i>a.</i> Volume et intensité des précipitations	10	5	0
<i>b.</i> Type de sol et caractéristiques géologiques	20	10	0
<i>c.</i> Couverture du sol	10	0	— 10
<i>d.</i> Utilisation du sol	10	0	— 10
<i>e.</i> Géomorphologie	20	10	0
<i>f.</i> Mécanisme d'érosion	25	10	0
<i>g.</i> Ruissellement	10	5	0
Érosion des lits			
<i>h.</i> Caractéristiques des sédiments			
<i>i.</i> Hydraulique des lits	25	10	0

There are five different approaches in predicting sediment yields for drainage basins for use primarily in the planning and design of a proposed dam and reservoir. In some situations, any one or more of these approaches may also be used above existing reservoirs where direct measurements are not possible either because of the time or cost involved. The five predictive approaches are as follows :

1. Evaluation of the nine factors affecting sediment yields,
2. Evaluation of gross erosion rate equations,
3. Application of sediment transport equations,
4. Empirical relationships from measurements,
5. Mathematical models.

The selection of an appropriate method will depend on the type of study, detail required, cost of study, applicability, and reliability of the method to the specific area. A description along with advantages and disadvantages for all methods is presented in subsequent paragraphs.

2.2.1. Evaluation of the Nine Factors Affecting Sediment Yield

This procedure involves considerable amount of judgment and experience in relating all of the factors contributing to the erosion and transport of sediment from a drainage area. The basic requirement is a field inspection by a sedimentation specialist to evaluate the factors and determine a sediment yield rate usually in tonne per square kilometer per year. Most investigators rely heavily on a comparison of the erosion or sediment producing factors with similar conditions in other drainage basins where some actual measurements were obtained either by sediment sampling or reservoir surveys. It is only through experience that this comparison can be made with any degree of reliability.

A good example on application of this type of procedure is described in the Pacific Southwest Interagency Committee (USA) report dated October 1968 [23]. Table 2-2 shows the factors and weighing system, not identical but similar to those

Table 2-2. — Rating chart of factors affecting sediment yield.

Factors	Sediment yield level		
	High	Moderate	Low
<i>a.</i> Rainfall amount and intensity	10	5	0
<i>b.</i> Soil type and geological information	20	10	0
<i>c.</i> Ground cover	10	0	— 10
<i>d.</i> Land use	10	0	— 10
<i>e.</i> Topography	20	10	0
<i>f.</i> Upland erosion	25	10	0
<i>g.</i> Runoff	10	5	0
Channel erosion			
<i>h.</i> Sediment characteristics			
<i>i.</i> Channel hydraulics	25	10	0

de pondération retenu; ils sont similaires mais non identiques à ceux exposés au début du chapitre 2 intitulé « Apports solides ». Les valeurs numériques attribuées aux différents taux d'apports solides indiqués sont corrélatives et peuvent être différentes dans d'autres parties du monde.

L'ouvrage de référence décrit les conditions du site qui amènent à attribuer aux facteurs du Tableau 2-2 les valeurs indiquées et donne la méthode de conversion des totaux en taux effectif d'apports solides.

2.2.2. Évaluation des équations du taux d'érosion brut

L'Équation Universelle de Perte de Sol (EUPS), définie par Wischmeier et Smith [24], est très largement acceptée et utilisée aux États-Unis et dans d'autres parties du monde pour déterminer les taux d'érosion bruts. Il s'agit d'une analyse complète de l'érosion impliquant une analyse par régression de plus de 10 000 relevés-ans de données fournies par les graphiques d'érosion de 42 stations expérimentales situées dans 23 États des États-Unis. D'autres modèles du type à régression linéaire ont été mis au point, la plupart visant à simplifier l'EUPS. Une méthode empirique, combinant le taux d'érosion brut et le taux d'apports solides a été mise au point par Jansen et Painter [25]. Il faut reconnaître que toutes les méthodes empiriques de calcul du taux d'érosion brut ne sont qu'approximatives et ne permettent que des estimations grossières.

L'équation EUPS s'écrit :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

où :

- A : moyenne annuelle de perte de sol en tonnes/hectare,
- R : coefficient d'érosion pluviale, généralement égal à l'indice d'érosion pluviale locale (EI) pour une période donnée,
- K : coefficient d'érosion du sol, soit une mesure quantitative de la vitesse d'érosion du sol,
- LS : coefficient géomorphologique, qui est un ajustement dans l'équation pour tenir compte de la longueur et de l'inclinaison de la pente,
- C : coefficient se rapportant à la culture et représentatif de la quantité d'humus ou de végétation, pour un site qui a été bouleversé et laissé à nu, à la merci des forces d'érosion,
- P : coefficient des mesures conservatoires, tenant compte des pratiques de lutte contre l'érosion telles que la culture en bandes, en courbes de niveau ou en terrasses.

Les coefficients permettant l'utilisation dans le système métrique de l'équation EUPS, sont donnés dans la Publication de la FAO n° 1 [26] et par Foster, McCool, Renard et Moldenhauer [27].

2.2.3. Application des équations de transport solide

Un certain nombre des équations de transport de fond peuvent être utilisées pour estimer approximativement le taux d'apports solides. Cette méthode ne s'applique que lorsque le débit de charriage de la rivière représente la partie la plus

used in the 1968 report. The factors given in Table 2-2 are the same as identified in the beginning of section 2, Sediment Yield. The numerical values for levels shown are relative to each other and could be changed for other parts of the world.

The reference provides descriptions of the field conditions leading to the assignment of the factors in Table 2-2 and a procedure for converting the sums into actual sediment yield rates.

2.2.2. Evaluation of Gross Erosion Rate Equations

The Universal Soil Loss Equation (USLE) defined by Wischmeier and Smith [24] is most widely accepted and used in the United States and other parts of the world for determining gross erosion rates. It was a comprehensive analysis of erosion involving a regression analysis of more than 10 000 plot-years of data from erosion plots at 42 experiment stations located in 23 states in the United States. Other linear regression-type models have been developed, most of them being an attempt to simplify the USLE. An empirical procedure to combine gross erosion rates and the sediment delivery ratios was developed by Jansen and Painter [25]. It should be recognized that any of the empirical methods for computing gross erosion are an approximation and considered a rough estimate.

The USLE equation is written :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

where :

- A : average annual soil loss in metric tons/hectare,
- R : the rainfall erosivity factor, usually equal to the local erosion index (EI) rainfall parameter for a given time period,
- K : the soil erodibility factor, which is a quantitative measure of the rate at which a soil will erode,
- LS : the topographic factor, an adjustment in the equation to account for slope length and steepness,
- C : the cropping management factor, represents the ratio of soil quantities by mulch or vegetative measures to that from a site that has been disturbed and left bare to erosive forces,
- P : the conservation practice factor which takes into account erosion control practice such as stripcropping, contouring, or terracing.

The coefficients for use of the USLE equation in metric form are given in the FAO Publication No. 1 [26] and by Foster, McCool, Renard, and Moldenhauer [27].

2.2.3. Application of Sediment Transport Equations

Many of the bed material transport equations can be used as rough approximations in prediction of sediment yields. This method is only applicable if the bed material in the river is the most critical portion of the total sediment being

importante du débit solide total. En d'autres termes, il est inutile de tenir compte des particules les plus fines, c'est-à-dire des silts et des argiles (de dimensions inférieures à 0,062 mm) pour le projet des ouvrages. Il en est ainsi des retenues où les fines particules ($< 0,062$ mm) restent en suspension et franchissent le barrage par les orifices de chasse.

Toutes les équations de transport de fond données au paragraphe 2.1.1, « Prélèvement d'échantillons de sédiments », peuvent être utilisées pour prévoir le transport de solides de fond d'une rivière. Pour appliquer l'une ou l'autre de ces équations ou toute autre équation similaire, on a besoin de prélèvements d'échantillons des matériaux du lit et des levés de profils en travers de la rivière. Les levés de profils en travers sont utilisés pour décrire l'hydraulique d'un tronçon de rivière. Les calculs du profil en long du plan d'eau dans le tronçon considéré et pour tous les régimes considérés du cours d'eau fournissent les caractéristiques hydrauliques du lit dont on a besoin : largeur, profondeur et vitesse de l'eau. La granulométrie des échantillons des matériaux du lit intervient dans le calcul du transport de fond pour des conditions précises d'hydraulique du lit. Cette méthode se fonde sur une hypothèse essentielle, à savoir que la taille des particules des matériaux du lit ne change pas avec le débit de l'eau.

L'étape de calcul suivante est la construction d'une courbe d'évaluation du débit solide de charriage. La relation entre le débit liquide, en mètres cubes par seconde, et le débit solide de charriage, en tonnes par jour, se présente généralement sous la forme d'une courbe, tracée sur papier log-log, calculée par la méthode des moindres carrés. Cette courbe, associée aux relevés disponibles du débit liquide, permet de déterminer les apports solides en amont du tronçon de rivière étudié. Cette courbe peut être associée à la courbe des débits classés pour calculer le débit charrié moyen, à long terme, par rapport au débit total — Bureau of Reclamation (USBR) [28].

2.2.4. Relations empiriques tirées des mesures

Une méthode très utilisée, et s'avérant fiable dans de nombreux cas, consiste à prévoir les apports solides à partir de relations empiriques tirées des mesures décrites au paragraphe 2.1, « Mesure des apports solides ». Cette méthode exige moins de données, aussi, quand l'estimation est faite par un spécialiste en alluvionnement, permet-elle de réaliser des économies substantielles sur le poste « reconnaissances ». Dans cette estimation, les données mesurées fournissent une base d'extrapolation pour des bassins versants similaires.

La méthode de prévision la plus courante consiste à utiliser le taux d'apports solides obtenu suivant les procédés exposés au paragraphe 2.1.1, « Prélèvement d'échantillons de sédiments ». Les mesures permettant d'obtenir le débit solide en suspension moyen et le débit solide total, à long terme, donnent l'apport solide total en amont de la station de jaugeage. Cet apport, exprimé en tonnes par kilomètre carré et par an peut s'appliquer à d'autres bassins versants ayant des caractéristiques identiques d'érosion et d'écoulement des sédiments. Deux autres méthodes sont également très utilisées pour transposer d'un bassin versant à un autre les mesures d'apports solides. La première consiste à appliquer directement les valeurs des apports solides et la seconde à appliquer à ces valeurs un coefficient de correction égal au rapport des débits d'eau. Un exemple illustrant ces deux méthodes est donné

transported. In other words, the finer material of silt and clay sizes (< 0.062 mm) are not significant in the design of a structure. This is true of reservoirs where the fine material (< 0.062 mm) stays in suspension and is flushed or sluiced through the dam.

All of the transport equations given in section 2.1.1., Sediment Sampling, could be used for predicting transport of the bed material in a river. The data needed to apply any of these or any other similar equations are samples of the bed material and surveyed cross sections of the river. The surveyed cross sections of the river are used to describe the hydraulics for a reach of river. Water surface profile computations for the reach and throughout the desired range in water discharges will provide the necessary channel hydraulics of width, depth, and velocity. The size distribution of the bed material samples is used to compute the bedload transport for a specified set of channel hydraulics. A critical assumption in this approach is that the bed material size does not change with discharge.

The next step in the computations is development of a bed material load rating curve. This relationship of water discharge in cubic meters per second versus bed material load in tonne per day is usually a log-log plot and a curve computed by least square analysis. The curve is combined with available water discharge records to determine the sediment yield above the sampled reach of river. It can be combined with a flow duration curve in a computation of long-term average sediment yield for the bed material portion of the total sediment load [28].

2.2.4. Empirical Relationships from Measurements

A very popular and in many cases a reliable method, is the prediction of sediment yield from empirically developed relationships from the measurements described in section 2.1., Measurements of Sediment Yields. The method requires the least amount of data but if properly evaluated by a sedimentation specialist will save considerable investigation money. In this evaluation, measured data provide a base for extrapolation to similar drainage areas.

The most common predictive method is the application of the sediment yield derived by procedures described in section 2.1.1., Sediment Sampling. Measurements for obtaining both long-term average suspended load and total load provide the total sediment yield above a gaging station. This yield expressed in tonne per square kilometers per year may be applicable to other drainage areas having similar erosion and sediment runoff characteristics. There are two more common methods for transposing a measured sediment yield from one drainage area to another. One method is to apply a sediment yield directly and another method is to adjust the yield by a correction factor equal to the ratio of water yields. An example of the two methods is best illustrated by the hypothetical drainage areas shown in the sketch for Table 2-3. Drainage area A ends at a gage with a measured

par le schéma du Tableau 2-3 représentant des bassins versants hypothétiques. Le bassin versant A se termine à une station de jaugeage où les apports solides sont mesurés.

Les bassins versants B et C peuvent être soit adjacents, soit situés dans la même zone générale. Pour choisir l'une ou l'autre de ces deux méthodes, le spécialiste doit se faire une opinion : penser que la concentration annuelle moyenne de sédiments sera la même pour les deux bassins versants (méthode II), ou que les taux d'apports solides seront les mêmes dans les deux bassins versants quels que soient les débits liquides dans les deux bassins (méthode I).

Une autre méthode satisfaisante de prévision des apports solides consiste à établir une relation entre les apports solides et les surfaces des bassins versants à partir des résultats des mesures d'apports solides effectuées soit par prélèvements d'échantillons, soit par levés topographiques des retenues, comme décrit au chapitre 2, « Apports solides ». L'expérience portant sur des régions semi-arides des États-Unis indique qu'il est généralement préférable d'établir les relations représentées sur la Fig. 2-8 en utilisant les données mesurées dans des bassins versants ayant des caractéristiques d'érosion et de transport solide identiques à celles du bassin dont on a besoin de connaître les apports solides. Cette méthode sert à vérifier les informations obtenues suivant d'autres méthodes ou à indiquer un taux d'apport solide approximatif. Cependant, le taux d'apport solide peut ne pas diminuer avec l'augmentation de la superficie du bassin versant. Avant d'appliquer cette méthode, il est important de comparer les facteurs dont dépend le taux d'apport solide.

sediment yield. Drainage areas B and C could either be adjacent or in the same general area. The test on which method to use depends on whether the investigator believes that the average annual sediment concentrations would be the same for the two drainage areas (method II) or that the sediment yield rates are the same (method I) regardless of the comparison of water yield in the two drainage areas.

Another good method for predicting sediment yields involves development of a sediment yield versus drainage area relationship from measured sediment yields either by sediment sampling or from reservoir surveys as described in section 2, Sediment Yield. Experience in semiarid portions of the USA indicates it is usually best to develop the relationships shown in Fig. 2-8 by use of measured data from drainage areas with similar erosion and sediment transport characteristics to that of the area where a sediment yield is needed. The method is used as a check on other methods or for rough approximations of sediment yield; however, yield rates may not necessarily decrease with drainage area increase. A comparison of sediment yield factors is critical before applying this method.

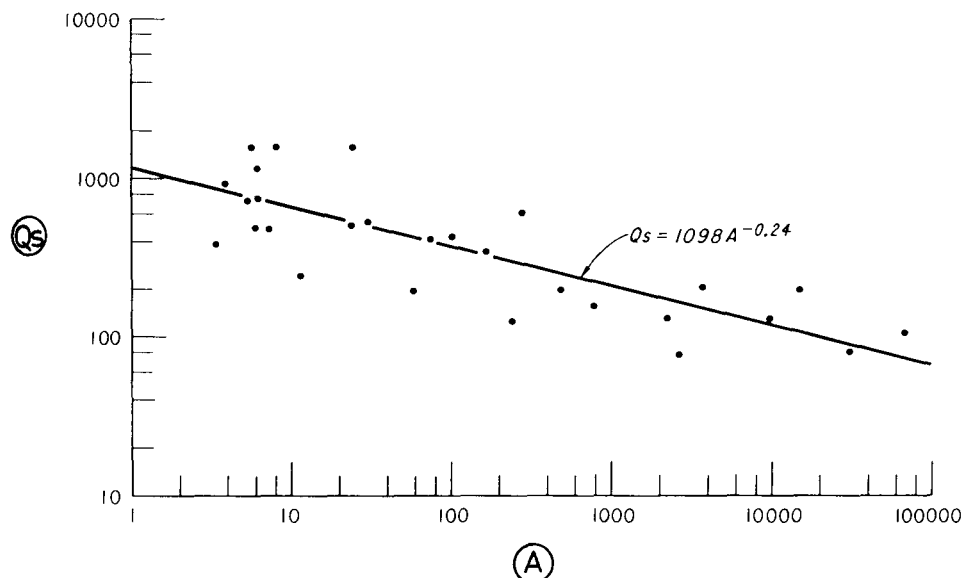


Fig. 2-8

Sediment yield from reservoir survey data
from semi-arid climate in the United States.

*Apports solides déterminés par levés topographiques
de retenues situées dans des régions semi-arides des États-Unis.*

Sediment yields from survey of 28 reservoirs in semi-arid climate of USA.

Apports solides de 28 retenues dans des zones semi-arides des États-Unis.

(A) Drainage area in km².

(A) Surface du bassin versant en km².

(Q_s) Sediments yield in m³/km² per yr.

(Q_s) Apports solides en m³/km² par an.

2.2.5. Modèles mathématiques

De nombreux spécialistes mettent au point des modèles mathématiques plus complexes et plus complets, permettant grâce aux ordinateurs modernes d'aujourd'hui d'estimer les apports solides. Les nombreux facteurs ou variables que comporte le modèle font appel aux plus importants des neuf facteurs énumérés au chapitre 2, « Apports solides ». Il convient également de vérifier les modèles par des mesures des apports solides, soit par prélèvements d'échantillons du débit solide en suspension, soit par levés topographiques des retenues.

L'application à tout bassin versant d'un modèle entièrement vérifié s'effectue en comparant le bassin, pour lequel on a disposé de mesures permettant cette vérification, au bassin en cours d'étude. C'est le spécialiste en alluvionnement des retenues qui décide si un modèle peut ou non s'appliquer directement à un autre bassin versant. La méthode de vérification a une grande importance car chaque variable ou facteur à considérer doit être analysé en tenant compte du poids que chacun des facteurs retenus aura sur les apports solides totaux.

Tableau 2-3. — Schéma et tableau concernant des bassins versants adjacents et leurs apports solides.

Bassin versant	Superficie km ²	Volume d'eau écoulée 10 ⁶ m ³ /an	Débit eau m ³ /km ² /an	Méthode I			Méthode II		
				Tonnes/km ² /an	Tonnes/an	Conc. mg/l	Tonnes/km ² /an	Tonnes/an	Conc. mg/l
A*	1 000	100	100	10 (1)	10 000	100 000	10	10 000	100 000
B	300	20	66,7	10 (2)	3 000	150 000	6,67 (3)	2 000	100 000
C	1 200	200	166,7	10 (2)	12 000	60 000	16,7 (3)	20 000	100 000

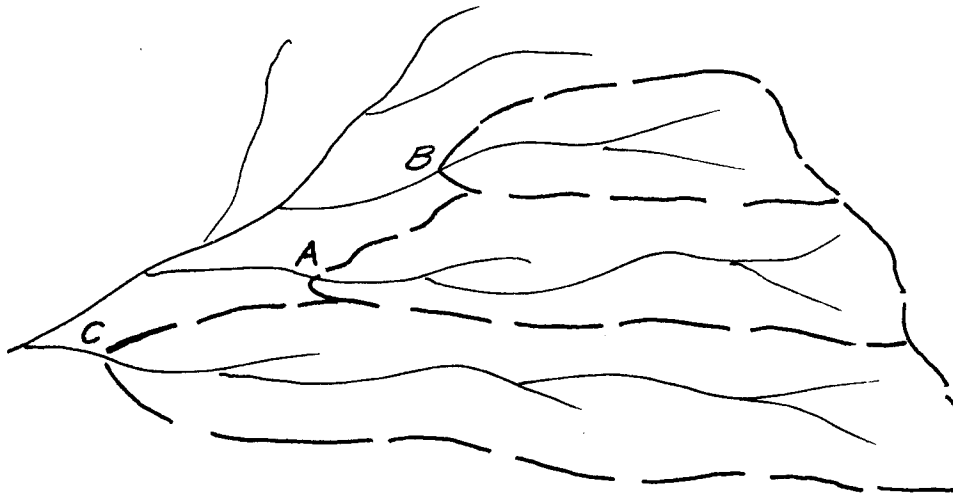
* Station de jaugeage.
 (1) Apport solide mesuré.
 (2) Taux d'apport solide supposé identique à celui du bassin A.
 (3) Taux d'apport solide = $\frac{\text{Débit d'eau de B ou C}}{\text{Débit d'eau de A}} \times (\text{Taux d'apport solide de A})$

2.2.5. Mathematical Models

Many investigators are developing more sophisticated and comprehensive mathematical models for predicting sediment yields for use on the modern day computer. The many factors or variables in the model utilize the most important of the nine factors given in section 2, Sediment Yield. The models must also be verified by measured sediment yields either from suspended sediment sampling or reservoir surveys.

The application of a fully tested model to any drainage area is dependent on comparing the drainage area where measurements were available for testing with the drainage area under investigation. This requires a decision by the sedimentation specialist on whether a model can be applied directly to any other drainage area. A method for testing is quite critical because each of the variables or factors involved should be analyzed with respect to the weight any of the identified factors would have on the total sediment yield.

Table 2-3. — Sketch and table of adjacent drainage areas and sediment yields



Drainage	Drainage area km ²	Runoff 10 ³ m ³ /yr	Water yield m ³ /km ² /yr	Method I			Method II		
				Tons/km ² / year	Tons/ year	Conc. mg/l	Tons/km ² / year	Tons/ year	Conc. mg/l
A*	1 000	100	100	10 (1)	10 000	100 000	10	10 000	100 000
B	300	20	66.7	10 (2)	3 000	150 000	6.67 (3)	2 000	100 000
C	1 200	200	166.7	10 (2)	12 000	60 000	16.7 (3)	20 000	100 000

* Gage.
 (1) Measured sediment yield.
 (2) Sediment yield assumed same as for drainage A.
 (3) Sediment yield = $\frac{\text{Water yield for B or C}}{\text{Water yield for A}} \times (\text{Sediment yield for A})$.

La majorité des modèles mathématiques utilisent pratiquement les mêmes facteurs que ceux décrits dans ce rapport, mais subdivisent l'analyse en deux parties. La première consiste à réaliser un modèle mathématique définissant l'apport solide ou l'érosion du bassin versant supérieur, qui dépend des précipitations, de la nature des sols, de la géologie, de la couverture et de l'utilisation du sol, de la géomorphologie et du réseau de drainage. Dans la seconde partie, on établit la loi du transport solide par la rivière qui dépend du ruissellement, des dimensions des sédiments et des caractéristiques hydrauliques du lit.

Plus on vérifie ou teste les modèles mathématiques de détermination des apports solides par rapport aux levés topographiques effectués sur des retenues, plus on augmente le nombre de leurs utilisations potentielles. Vu le grand nombre de données requises et le coût de tels modèles, cette méthode convient plus particulièrement aux problèmes d'apports solides les plus complexes.

Most mathematical models use essentially the same factors as described in this report, but subdivide the analysis into two components. One requires the development of a mathematical model to define the sediment supply or erosion from the upland drainage area as influenced by rainfall, soils, geology, ground cover, land use, topography, and drainage network. The second part of the model is to relate sediment transportation by the river which is dependent on runoff, sediment sizes, and channel hydraulic characteristics.

With more of the mathematical sediment yield models being verified or tested against actual reservoir surveys, more potential uses are possible. The large amount of data required and costs involved make the method more adapted to the more complex sediment yield problems.

3. DÉPÔTS SOLIDES

Les sédiments entrant dans une retenue s'y déposent ou franchissent le barrage. Les dépôts peuvent avoir un caractère permanent ou, dans certains cas, du fait de débits de crue élevés et d'un niveau bas de la retenue, ils peuvent progresser dans la retenue ou même passer à travers les vidanges de fond. Les sédiments franchissant le barrage sont généralement des fines particules ($< 0,062$ mm) en suspension ou déplacées par des courants de densité au début de l'existence de la retenue. Au fur et à mesure que la retenue se remplit de sédiments, une partie des gros éléments ($> 0,062$ mm) peut passer à travers le barrage. Dans certaines conditions particulières, le barrage est équipé de vannes d'évacuation permettant de laisser passer de forts débits de crues et de chasser davantage de sédiments, comprenant ceux de diamètre supérieur à $0,062$ mm.

Les caractéristiques des dépôts solides varient d'une retenue à l'autre. Les levés topographiques des retenues et les données recueillies sur les dépôts solides ont permis de déterminer un grand nombre de caractéristiques du phénomène de dépôt dont on tient compte désormais au stade des études d'un barrage et d'une retenue. On dispose de relations empiriques, établies à partir de levés topographiques des retenues et de données obtenues par des prélèvements, relatives aux caractéristiques du phénomène de dépôt; ces relations portent sur le taux de rétention des apports solides dans les retenues, la masse volumique des dépôts solides, la répartition des dépôts et la hauteur de la couche de sédiments au droit du barrage.

3.1. TAUX DE RÉTENTION

Le taux de rétention d'une retenue est le rapport entre la quantité de sédiments déposés et les apports solides totaux. Ce rapport ou pourcentage de matériaux solides retenus dépend du volume et de la granulométrie des sédiments entrant, du débit s'écoulant dans la retenue et des niveaux d'exploitation de la retenue. Les meilleures relations empiriques connues sur le taux de rétention des retenues ont été établies par Gunnar Brune [29] et M. A. Churchill [30]. Ces relations ont été améliorées par B. N. Murthy [31]. La méthode de Brune a été adoptée pour la plupart des grandes retenues. Elle a été mise au point à partir de 44 levés topographiques de retenues et elle fait intervenir le rapport entre la capacité de la retenue et les apports annuels moyens, comme l'illustre la Fig. 3-1. La courbe moyenne de Brune, pour une retenue normale, y est représentée, bien que toute une série de courbes enveloppes figure dans le rapport initial de Brune.

La relation empirique de Churchill sur le taux de rétention a été établie à partir de retenues de la Tennessee Valley Authority; elle donne le pourcentage des apports solides traversant la retenue en fonction d'un indice d'alluvionnement. Cet indice est défini comme le rapport entre la période de rétention et la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau à travers la retenue. La courbe de Churchill a été convertie en une expression purement non dimensionnelle en multipliant l'indice d'alluvionnement par l'accélération due à la pesanteur, d'une façon identique à ce qui a

3. SEDIMENT DEPOSITS

Sediment inflow to a storage reservoir will be either deposited or moved on through the dam. The deposits may be permanent, or in some situations, deposits because of high flood flows and or low reservoir stage, may move further into the reservoir or possibly be sluiced through outlets. Sediments transported through the dam are usually finer material (< 0.062 mm) carried in suspension or moved by density currents during early life of the reservoir. As the reservoir becomes filled with sediment, some of the coarser (> 0.062 mm) material may be transported through the dam. There are special conditions when sluice gates at the dam are designed to handle large flood discharges to sluice more sediment including the > 0.062 mm fraction through the dam.

The characteristics of sediment deposits will vary from reservoir to reservoir. From reservoir surveys and collection of data on sediment deposits, many deposition characteristics have been defined and are now considered in the design of a dam and reservoir. Empirical relationships developed from the reservoir survey and sampling data on depositional characteristics are available on reservoir trap efficiencies, density of sediment deposits, distribution patterns, and depths of sediment at the dam.

3.1. TRAP EFFICIENCY

The trap efficiency of a reservoir is defined as the ratio of the quantity of sediment deposited to the total sediment inflow. This ratio or percent of material trapped is dependent on the volume and particle size analysis of incoming sediment, water discharge flowing through the reservoir, and operation levels in the reservoir. The best known empirical relationships on trap efficiency were developed by Gunnar Brune [29] and M. A. Churchill [30]. These relationships have been supported by B. N. Murthy [31]. The Brune Method has been adopted for most large storage reservoirs. It was developed from 44 surveys of reservoirs and uses, the storage capacity inflow relationship as shown in Fig. 3-1. The median curve for a normal ponded reservoir by Brune is shown, although a set of envelope curves was given in Brune's original paper.

The Churchill trap efficiency relationship was developed from Tennessee Valley Authority reservoirs with percent of incoming sediment passing through the reservoir versus a sedimentation index. The sedimentation index is defined as the ratio of the period of retention to the mean water discharge velocity through the reservoir. The Churchill curve has been converted to a truly dimensionless expression by multiplying the sedimentation index by acceleration due to gravity in a manner similar to that proposed by B. N. Murthy [31]. This dimensionless

été proposé par B. N. Murthy [31]. Cette courbe sans dimensions de Churchill apparaît également sur la Fig. 3-1, ainsi que l'équation permettant de calculer le taux de rétention à l'aide de cette courbe et de points ajoutés à la courbe par l'USBR à la suite d'études de retenues. Pour faciliter l'utilisation de la courbe de Churchill, il est bon de définir les termes suivants :

Capacité : Volume de la retenue, en m^3 , au niveau moyen d'exploitation, pendant la période à analyser.

Débit entrant : Débit quotidien moyen entrant, pendant la période considérée, en m^3/s .

Période de rétention : Capacité (en m^3) divisée par le débit entrant (en m^3/s).

Longueur : Longueur de la retenue, en mètres, au niveau moyen d'exploitation.

Vitesse : Vitesse moyenne, en m/s , obtenue en divisant le débit entrant par la superficie moyenne du profil en travers, en m^2 . La superficie moyenne peut être déterminée en divisant la capacité par la longueur.

Indice d'alluvionnement : Période de rétention divisée par la vitesse.

La Fig. 3.1 est une illustration des méthodes de Brune et de Churchill pour le calcul du taux de rétention. Il ne faut pas considérer cette figure comme une comparaison de ces méthodes. En règle générale, il est conseillé d'utiliser la Méthode de Brune pour les grandes retenues ou les retenues normales établies sur un cours d'eau, et la courbe de Churchill pour les bassins de décantation, les petites retenues, les ouvrages d'amortissement des crues, les retenues à moitié vides ou les retenues à évacuation continue.

Quand l'accumulation prévue des apports solides représente un fort pourcentage de la capacité de la retenue, il est nécessaire d'analyser par périodes, le taux de rétention de la retenue. En théorie, le taux de rétention d'une retenue diminue continuellement depuis sa mise en eau. Cependant, pour la plupart des retenues, il n'est pas envisageable d'analyser le taux de rétention à intervalles de moins de 10 ans. La variabilité du débit solide annuel entrant est une raison suffisante pour ne pas réduire la périodicité des analyses.

3.2. PRÉVISION DES TAUX DE CONSOLIDATION DES DÉPÔTS SOLIDES

Le prélèvement de sédiments déposés au fond des retenues fournit des informations utiles sur la masse volumique de ces dépôts. La masse volumique des matériaux déposés, exprimée en masse sèche par volume unitaire, sert à convertir en volume la masse des apports solides totaux dans une retenue. La conversion est nécessaire quand les apports solides totaux sont calculés à partir d'un programme de mesures de prélèvements de sédiments en suspension et sédiments charriés. Les principaux facteurs dont dépend la masse volumique des dépôts solides dans une retenue sont : (a) le mode d'exploitation de la retenue, (b) la texture et les dimensions des particules solides déposées, (c) le taux de compaction (ou de consolidation) des dépôts solides.

Le mode d'exploitation de la retenue est probablement le facteur le plus déterminant. Les sédiments déposés dans des retenues soumises à des creux considérables se trouvent à découvert pendant de longues périodes au cours desquelles ils se consolident. Les retenues dont le niveau d'exploitation est relativement stable ne permettent pas aux dépôts solides de sécher et donc de se consolider dans les mêmes proportions.

Churchill curve is also shown on Fig. 3-1, along with the equation for computing the trap efficiency by use of the Churchill curve and additional plotted points added by the U.S. Bureau of Reclamation from reservoir study data. The following description of terms will be helpful in using the Churchill curve :

Capacity : Capacity of the reservoir in the mean operating pool for the period to be analyzed in cubic meters.

Inflow : Average daily inflow rate during the study period in cubic meters per second.

Period of retention : Capacity divided by inflow rate. Capacity is in cubic meters and inflow in cubic meters per second.

Length : Reservoir length in meters at mean operating pool level.

Velocity : Mean velocity in meters per second, which is arrived at by dividing the inflow by the average cross-sectional area in square meters. The average cross-sectional area can be determined from the capacity divided by the length.

Sedimentation index : Period of retention divided by velocity.

Figure 3-1 is an illustration of the Brune and Churchill methods for computing trap efficiencies and should not be viewed as a comparison of methods. A general guideline is to use the Brune Method for large storage or normal ponded reservoirs, and the Churchill curve for settling basins, small reservoirs, flood retarding structures, semidry reservoirs, or reservoirs that are continuously sluiced.

When the anticipated sediment accumulation is a large percentage of the reservoir capacity, it is necessary that the trap efficiency be analyzed for incremental periods of the reservoir life. Theoretically, the reservoir trap efficiency will decrease continuously once storage is begun; however, for most reservoirs it is not practical to analyze the trap efficiency in intervals of less than 10 years. The variability of the annual sediment inflow is sufficient reason not to use shorter periods of analysis.

3.2. PREDICTION OF CONSOLIDATION RATES FOR DEPOSITS

Samples of deposited sediments in reservoirs have provided useful information on the density of deposits. The density of deposited material in terms of dry mass per unit volume is used to convert total sediment inflow to a reservoir from a mass to a volume. The conversion is necessary when total sediment inflow is computed from a measured suspended and bed material sediment sampling program. Basic factors influencing density of sediment deposits in a reservoir are : (a) the manner in which the reservoir is operated, (b) the texture and size of deposited sediment particles, and (c) the compaction or consolidation rate of deposited sediments.

The reservoir operation is probably the most influential of these factors. Sediments that have deposited in reservoirs subjected to considerable drawdown are exposed for long periods and undergo a greater amount of consolidation. Reservoirs operating with a fairly stable pool do not allow the sediment deposits to dry out and consolidate to the same degree.

Les dimensions des éléments solides entrant dans la retenue influent largement sur la masse volumique des dépôts. Les dépôts constitués de silt et de sable ont une masse volumique supérieure à ceux où l'argile est prépondérante. La classification des sédiments suivant leurs dimensions, comme elle a été proposée par l'American Geophysical Union, est très semblable à la classification suivante, utilisée internationalement.

Type de sédiments	Dimensions, en mm
Argile	Inférieures à 0,004
Silt	0,004 à 0,062
Sable	0,062 à 2

L'accumulation de nouvelles couches de sédiments sur les anciennes modifie la masse volumique des dépôts antérieurs. La consolidation influe sur la masse volumique moyenne tout au long de la durée de vie estimée de la retenue, par exemple sur une période de 100 ans. Un bon exemple de consolidation de sédiments déposés est donné dans le rapport de Lara et Sanders [22]; il concerne les masses volumiques des dépôts solides du Lac Mead en un lieu où les prélèvements ne révèlent que la présence de sédiments de la taille de l'argile.

La méthode de détermination de la masse volumique des sédiments déposés, qui est exposée ci-dessous, est celle de l'USBR [28]. Elle prend en compte les trois facteurs précités et repose sur la formule de compaction mise au point par Miller [32]. Le mode d'exploitation de la retenue est certainement le facteur le plus déterminant en raison de l'importante consolidation ou séchage que risque de subir l'argile présente dans le dépôt solide quand une retenue est soumise à des creux de grande amplitude. La taille des particules solides entrant dans la retenue influe aussi sur la masse volumique des dépôts, comme le montre la variation de la masse initiale. Les masses initiales de quelque 1 300 échantillons ont été analysées statistiquement par Lara et Pemberton [33] afin de formuler les équations mathématiques donnant la variation des masses initiales des dépôts suivant le mode d'exploitation de la retenue considérée. D'autres données sur la masse volumique des matériaux déposés, fournies par de nouveaux levés topographiques de retenues, ont affiné les équations de Lara et Pemberton [33] et de Lane et Koelzer [34].

Les modes d'exploitation des retenues ont été classés comme suit :

Type	Exploitation de la retenue
1	Sédiments toujours submergés ou pratiquement submergés.
2	Creux moyen à considérable en temps normal.
3	Retenue vide en temps normal.
4	Sédiments dans le lit mineur.

On peut généralement choisir le type de retenue en se basant sur les études d'exploitation de la retenue effectuées.

Une fois choisi le type de retenue, on peut estimer la masse volumique initiale des dépôts solides en utilisant l'équation suivante :

$$W_i = W_c p_c + W_m p_m + W_s p_s \quad (3)$$

The size of the incoming sediment particles has a significant effect upon density. Sediment deposits composed of silt and sand will have higher densities than those in which clay predominates. The classification of sediment according to size as proposed by the American Geophysical Union is quite similar to those used internationally as follows :

Sediment type	Size range in mm
Clay	Less than 0.004
Silt	0.004 to 0.062
Sand	0.062 to 2.0

The accumulation of new sediment deposits on top of previously deposited sediments changes the density of earlier deposits. This consolidation affects the average density over the estimated life of the reservoir, such as for a 100-year period. A good example on consolidation of deposited sediments is shown in the report by Lara and Sanders [22] for densities in Lake Mead at a sampling location with all clay-size material.

The method that takes into account all three factors in determining the density of deposited sediment is demonstrated below as taken from Bureau of Reclamation [28] and based on the compaction equation developed by Miller [32]. The influence of reservoir operation is most significant because of the amount of consolidation or drying out that can occur in the clay fraction of the deposited material when a reservoir is subjected to considerable drawdown. The size of sediment particles entering the reservoir will also have an effect on density as shown by the variation in initial mass. The initial masses of some 1 300 samples were statistically analyzed by Lara and Pemberton [33] for determining mathematical equations of variation of initial masses with the type of reservoir operation. Additional data on density of deposited material from reservoir resurveys have supported the Lara and Pemberton [33] as well as the Lane and Koelzer [34] equations.

Reservoir operations were classified according to type as follows :

<i>Type</i>	<i>Reservoir operation</i>
1	Sediment always submerged or nearly submerged.
2	Normally moderate to considerable reservoir drawdown.
3	Reservoir normally empty.
4	Riverbed sediments.

Selection of the proper reservoir type can usually be made from the operation study prepared for the reservoir.

Once the reservoir type has been selected, the initial density of the sediment deposits can be estimated using the following equation :

$$W_i = W_c p_c + W_m p_m + W_s p_s \quad (3)$$

dans laquelle :

W_1 : masse volumique, en kilogrammes par mètre cube,

p_c, p_m, p_s : pourcentages respectifs d'argile, de silt et de sable des éléments solides entrant dans la retenue (Tableau page 58).

W_c, W_m, W_s : coefficients respectifs de l'argile, du silt et du sable, donnés par le tableau suivant :

Type de retenue	W_c	W_m	W_s
1	416	1 120	1 550
2	561	1 140	1 550
3	641	1 150	1 550
4	961	1 170	1 550

La masse volumique des sédiments déposés augmente en fonction des années passées dans la retenue, suivant l'équation :

$$W = W_1 + K \log_{10} T \quad (4)$$

dans laquelle

W : masse volumique après T années de consolidation,

W_1 : masse volumique initiale déduite de l'équation (3),

K : constante dépendant de la granulométrie des sédiments.

Cette équation, destinée à déterminer la masse volumique des dépôts solides dans les retenues après un certain temps d'exploitation de ces retenues, a été donnée par Lane et Koeltzer [34]. Cependant, une partie des sédiments se dépose au cours de chacune des T années d'exploitation et les dépôts de chacune de ces années ont un temps de compaction différent. Miller [32] a formulé l'équation suivante qui permet de déterminer approximativement la masse volumique moyenne de tous les sédiments déposés au cours des T années d'exploitation d'une retenue.

$$W_T = W_1 + 0,4343 K \left(\frac{T}{T-1} (\log_e T) - 1 \right) \quad (5)$$

dans laquelle :

W_T : masse volumique moyenne après T années d'exploitation de la retenue,

W_1 : masse volumique initiale tirée de l'équation (3),

K : constante dépendant du mode d'exploitation de la retenue (Tableau ci-dessus) et de la granulométrie des sédiments donnée par le tableau suivant :

Type de retenue	K		
	Sable	Silt	Argile
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

La valeur résultante peut être ainsi utilisée pour convertir la masse des sédiments entrants en volume qu'ils occuperont dans la retenue au bout de 100 ans.

where :

W_1 : density in kilograms per cubic meter,

p_c, p_m, p_s : percentages of clay, silt, and sand, respectively, of the incoming sediments (Table p. 59),

W_c, W_m, W_s : coefficients of clay, silt, and sand, respectively, which can be obtained from the following tabulation :

Reservoir type	W_c	W_m	W_s
1	416	1 120	1 550
2	561	1 140	1 550
3	641	1 150	1 550
4	961	1 170	1 550

The density of the deposited sediment will increase each year it remains in the reservoir. The equation :

$$W = W_1 + K \log_{10} T \quad (4)$$

in which :

W : density after T years of compaction,

W_1 : the initial density from Equation 3,

K : constant dependent upon the size analysis of the sediment.

This equation has been presented for use in determining the density of sediment deposits in reservoirs after a period of reservoir operation [34]. However, part of the sediment will deposit in the reservoir in each of the T years of operation and each year's deposits will have a different compaction time. Miller [32] developed an approximation of the integral for determining the average density of all sediment deposited in T years of operation as follows :

$$W_T = W_1 + 0.4343 K \left(\frac{T}{T-1} (\log_e T) - 1 \right) \quad (5)$$

where :

W_T : average density after T years of reservoir operation,

W_1 : initial density as derived from Equation 3,

K : constant based on type of reservoir operation (see Table above) and sediment size analysis as obtained from the following table :

Reservoir type	K		
	Sand	Silt	Clay
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

The resulting value may then be used to convert the mass of incoming sediment to the volume it will occupy in the reservoir after 100 years.

3.3. MÉTHODES DE PRÉVISION DES FORMES DES DÉPÔTS

Les données fournies par les levés topographiques de retenues existantes — traitées au paragraphe 2.1.2. — ont servi à établir des relations empiriques destinées à prévoir la répartition des dépôts dans les retenues. Les deux modes les plus courants de représentation de la répartition des dépôts dans les retenues reposent sur le tracé des courbes hauteur-volume des dépôts solides ou hauteur des dépôts-longueur de la retenue, comme indiqué par les Fig. 2-6 et 2-7. Chacun de ces modes de représentation illustre l'accumulation des sédiments qui se déposent du fait d'une diminution de la vitesse de l'eau et de la variation des turbulences suivant la profondeur et la longueur de la retenue. Les deux méthodes montrent nettement que les sédiments ne se déposent pas nécessairement dans les tranches inférieures des retenues.

La Fig. 3-2 donne un graphique schématique de la répartition des dépôts de solides, montrant les effets de l'alluvionnement des retenues sur leur capacité de stockage. Une étude de répartition des sédiments se divise en deux parties. La première consiste à tracer la courbe hauteur-capacité de la retenue pendant sa durée de vie prévue — 100 ans dans le cas présent; elle est représentée dans la partie gauche de la Fig. 3-2. Cette répartition fournit des informations sur la perte de capacité de stockage résultant de l'alluvionnement dans chacune des différentes tranches de la retenue et indique la hauteur prévue des dépôts solides au droit du barrage. La seconde partie, qui ne s'impose peut-être pas pour toutes les retenues, consiste en une étude du profil d'alluvionnement, destinée à déterminer la répartition des dépôts dans le delta, comme cela apparaît sur la droite de la Fig. 3-2.

Les sédiments accumulés se répartissent généralement au dessous du niveau normal de retenue. Cependant, si la retenue possède une tranche de crue remplie pendant des périodes significatives, une partie des sédiments peuvent s'y déposer. La Fig. 3-3 donne un graphique établi à partir des données recueillies aux États-Unis sur 11 retenues de la région des Grandes Plaines; il peut servir de guide pour estimer la proportion du total des sédiments déposés qui se situera au-dessus du plan d'eau normal. Ce graphique ne permet toutefois que des estimations approximatives qu'il faut accueillir avec discernement, en tenant compte du mode d'exploitation de la retenue et de la nature des solides entrant. Cette courbe repose sur un nombre limité de données et doit être revue dès qu'on disposera de nouvelles données.

Le terme « indice de tranche de crue » est le rapport entre la hauteur de la tranche de crue et la hauteur sous la tranche de crue, multiplié par le temps, en pourcentage, pendant lequel le plan d'eau de la retenue s'est trouvé dans la tranche de crue. Dans le cas d'un projet de retenue, il faut se reporter, pour avoir cette information, à l'étude de l'exploitation de la retenue.

Une fois établie la quantité de sédiments qui se déposera sous le niveau normal de retenue, on peut recourir à l'Empirical Area-Reduction Method [35], pour estimer la répartition des dépôts solides à n'importe quel moment. Cette méthode a été mise au point initialement en se fondant sur les données fournies par les nouveaux levés topographiques de 30 retenues; elle a été décrite par Borland et Miller [36], mise à jour par Lara [35] et modifiée ultérieurement par Pemberton [21]. Cette méthode reconnaît que la répartition des sédiments dépend : (a) du mode d'exploitation de la retenue, (b) de la texture et des dimensions des sédiments déposés, (c) de la forme de la retenue, (d) du volume des sédiments déposés dans la retenue. Toutefois, c'est

3.3. METHODS FOR PREDICTION OF DEPOSIT SHAPES

The data obtained from surveys of existing reservoirs as described in section 2.1.2. have been used to develop empirical relationships for predicting sediment distribution patterns in reservoirs. The two most common techniques to describe sediment distribution patterns in reservoirs are based on plots of depth versus sediment volume and depth versus reservoir length as shown in Fig. 2-6 and 2-7. Either of these techniques illustrate the accumulation of sediment particles being deposited because of the decrease in water velocity and changes in turbulence taking place throughout the depth and length of the reservoir. Both methods clearly illustrate that sediment deposition is not necessarily confined to the lower storage regions of the reservoir.

A schematic diagram of anticipated sediment deposition (Fig. 3-2) shows the effect of sediment on storage. There are two parts to a sediment distribution study. The first is the development of an elevation versus capacity curve for the life of the reservoir, in this case assumed 100 years as depicted at the left side of Fig. 3-2. This distribution provides information on loss of storage due to sediment in any assigned storage space in addition to the projected depth of sediment at the dam. The second part, which may not be required for all reservoirs, is a sediment profile study shown on the right side of Fig. 3-2 for defining deposition in the delta.

Accumulated sediment is usually distributed in a reservoir below the top of the conservation pool or normal water surface. However, if the reservoir has a flood control pool which is occupied for significant periods of time, a portion of the sediment accumulation may be deposited within this pool. Fig. 3-3 is a plot of data from 11 Great Plains reservoirs in the United States which may be used as a guide in estimating the portion of the total sediment accumulation which will deposit above the normal water surface. This plot should be regarded as a rough guide only, and the estimate obtained from it should be tempered with some judgment based upon the proposed reservoir operation and the nature of the incoming sediment. This curve is based on a limited amount of data and may be revised as more information becomes available.

The term " flood pool index " is computed as the ratio of the flood control pool depth to the depth below the flood pool, multiplied by the percent of time the reservoir water surface will be within the flood control pool. This information for a proposed reservoir must be obtained from the reservoir operation study.

Once the quantity of sediment which will deposit below the normal water surface has been established, the Empirical Area-Reduction Method may be used to estimate the distribution at any given time [35]. This method was first developed from data gathered in the resurvey of 30 reservoirs and is described by Borland and Miller [36] with revisions by Lara [35] and subsequent changes by Pemberton [21]. The method recognized that distribution of sediment is dependent upon : (a) the manner in which the reservoir is to be operated, (b) the texture and size of deposited sediment particle, (c) shape of the reservoir, and (d) volume of sediment deposited in the reservoir. However, the shape factor was adopted as the major criterion for

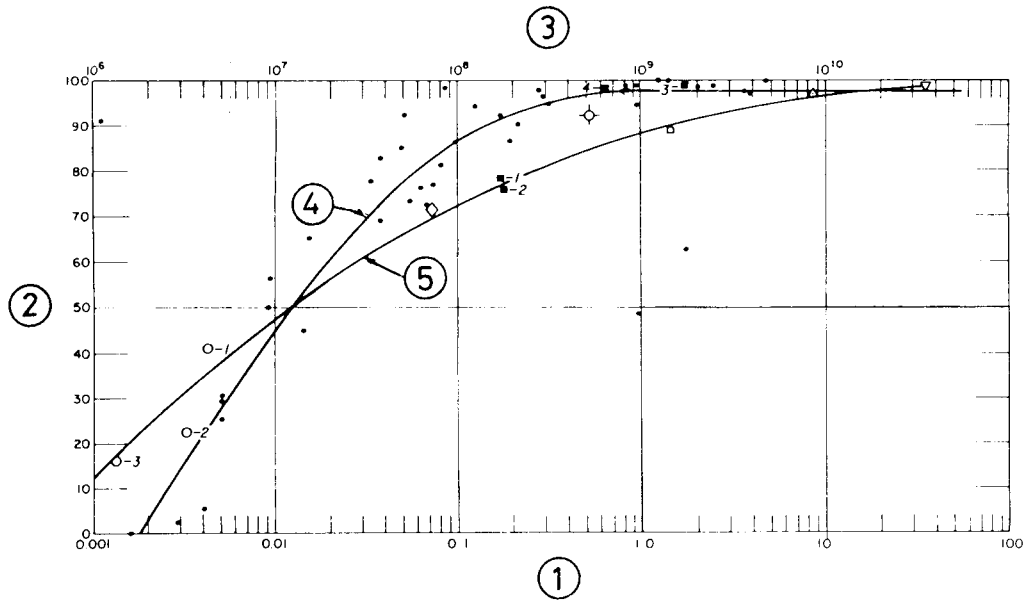


Fig. 3-1

Trap efficiency curves.
Courbes des taux de rétention.

- | | |
|--|--|
| (1) Ratio of reservoir capacity to average annual inflow. | (1) Rapport de la capacité de la retenue aux apports moyens annuels. |
| (2) Sediment trapped in percent. | (2) Taux de rétention des apports solides en pourcentage. |
| (3) $K = SI$ (Sedimentation index by Churchill) $\times g$. | (3) $K = SI$ (index de sédimentation de Churchill) $\times g$. |
| (4) Brune Medium Curve. | (4) Courbe moyenne de Brune. |
| (5) Churchill Trap Efficiency.
$\% = 100 - (1600 k^{0.2} - 12)$. | (5) Taux de rétention selon Churchill.
$\% = 100 - (1600 k^{0.2} - 12)$. |
| ● Brune's Data Points. | ● Données de Brune. |
| ■ 1 Matatila (India) 1962-1972. | ■ 1 Matatila (Inde) 1962-1972. |
| ■ 2 Hirakud (India) 1957-1973. | ■ 2 Hirakud (Inde) 1957-1973. |
| ■ 3 Gandhi Sagar (India) 1962-1972. | ■ 3 Gandhi Sagar (Inde) 1962-1972. |
| ■ 4 Bhakra (India) 1962-1973. | ■ 4 Bhakra (Inde) 1962-1973. |

Data added to Churchill relationship by USBR.

Données ajoutées par USBR au graphique de Churchill.

- ▽ Denison (Lake Texoma) 1942-1954.
- ◇ Lake Corpus Christi 1942-1948.
- △ Fort Supply Reservoir 1928-1947.
- Guernsey 1928-1947.
- 1 Special Study July 10-19, 1960.
- 2 Special Study Aug. 8-18, 1960.
- 3 Special Study July 27-31, 1961.
- John Martin 1942-1957.

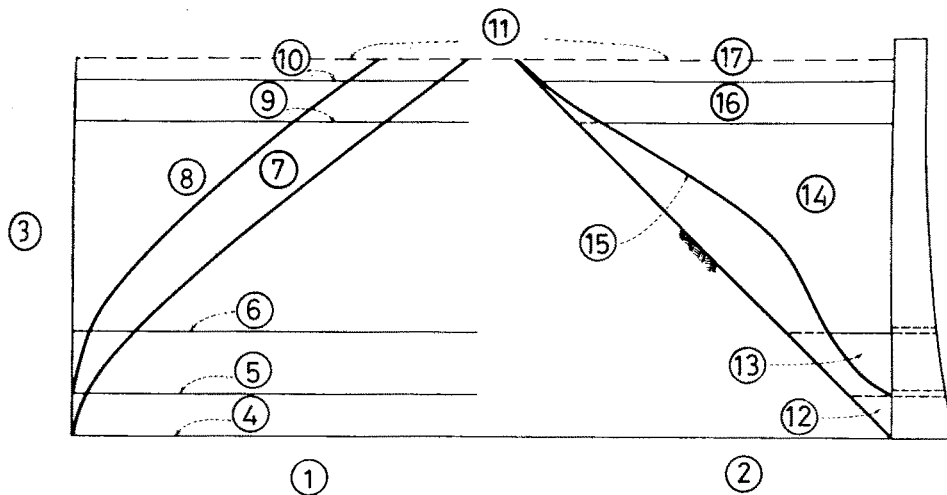


Fig. 3-2

Schematic diagram. Reservoir allocations, sediment deposition.

Graphique schématique des tranches d'une retenue et des dépôts solides.

- | | |
|---|--|
| (1) Capacity. | (1) Capacité. |
| (2) Distance. | (2) Distance. |
| (3) Elevation. | (3) Niveau. |
| (4) Streambed. | (4) Lit de la rivière. |
| (5) Top of dead storage. | (5) Sommet du culot non vidangeable. |
| (6) Top of inactive storage. | (6) Niveau minimal d'exploitation. |
| (7) Original capacity. | (7) Capacité d'origine. |
| (8) Capacity after 100 years. | (8) Capacité après 100 ans. |
| (9) Top of active conservation storage. | (9) Niveau normal de retenue. |
| (10) Top of flood control. | (10) Niveau maximal de la tranche de crue. |
| (11) Maximum water surface elevation. | (11) Niveau maximal. |
| (12) Dead storage. | (12) Culot non vidangeable. |
| (13) Inactive storage. | (13) Culot vidangeable. |
| (14) Conservation storage. | (14) Réserve utile. |
| (15) 100 year sediment profile. | (15) Profil des dépôts après 100 ans. |
| (16) Flood Control Pool. | (16) Tranche de crue. |
| (17) Surge. | (17) Surremplissage. |

la forme de la retenue qui était considérée comme le principal critère lors de l'établissement des courbes empiriques donnant la répartition des sédiments. La forme de la retenue est définie par le rapport entre sa hauteur et sa capacité totale, où m est l'inverse de la pente de la courbe hauteur-capacité tracée sur papier logarithmique; sur cette base, la classification des retenues est la suivante :

Type de retenue	Classification	m
1	Lac	3,5 à 4,5
2	Plaine d'inondation - colline basse	2,5 à 3,5
3	Colline	1,5 à 2,5
4	Gorge	1 à 1,5

La méthode actuellement utilisée par le Bureau of Reclamation des États-Unis pour prévoir la répartition des dépôts solides suivant la hauteur de la retenue consiste à recourir aux courbes de calcul présentées à la Fig. 3-4. La courbe de répartition du type 4 sert dans le cas extrême où une retenue est vidée chaque année et mise à sec, alors que la plupart des retenues répondent aux types 1, 2 ou 3. En attribuant le même poids au mode d'exploitation et à la forme de la retenue, un type de répartition peut être choisi à partir du Tableau 3-1. Dans le cas où le choix est laissé entre deux types de répartition, il convient, pour prendre la meilleure décision, de voir quel est le facteur le plus important : le mode d'exploitation ou la forme de la retenue. La texture et les dimensions des sédiments déposés doivent également entrer en ligne de compte dans ce jugement, en considérant les points suivants :

Taille prédominante	Type
Sable ou éléments plus gros	1
Silt	2
Argile	3

Les sédiments de la plupart des réseaux hydrographiques sont constitués d'un mélange de particules ayant les dimensions de l'argile, du silt et du sable et il s'est avéré que le facteur « dimensions des particules » était le moins important dans le choix du type de courbe de calcul de la Fig. 3-4. Ce n'est que dans le cas où l'on hésiterait entre deux modes possibles de répartition qu'il faut considérer les dimensions des sédiments dans le choix de la courbe de calcul. La publication de Lara [35] indique la méthode donnant la répartition correspondant au choix de la courbe appropriée.

Le delta ou la partie des dépôts solides située le plus en amont est la partie la plus critique du profil longitudinal de répartition des dépôts car elle peut affecter le profil de la zone de remous. Il faut une étude détaillée du delta quand l'alluvionnement dans la zone immédiatement en amont du réservoir accroît l'inondation des terres et des ouvrages tels que des ponts ou des habitations. La formation des deltas est traitée plus complètement au paragraphe 5.1.

development of empirically derived design curves for use in distributing sediment. The shape of the reservoir is defined by the depth to capacity relationships, where m is the reciprocal of the slope of the depth versus capacity plot on a logarithmic paper, and the classification of reservoirs on this basis is as follows :

Reservoir type	Classification	m
1	Lake	3.5-4.5
2	Floodplain - foothill	2.5-3.5
3	Hill	1.5-2.5
4	Gorge	1.0-1.5

The procedure now used by the Bureau of Reclamation for distribution with depth is that of using design curves shown in Fig. 3-4. Type 4 distribution is used for an extreme case where a reservoir is emptied every year with no storage of water, while most reservoirs are classified either type 1, 2, or 3. With equal weight applied to reservoir operation and shape, a type distribution is selected from Table 3-1. In those cases where a choice of two types are given a judicious decision can be made on whether the reservoir operation or shape of reservoir is more influential. The texture and size of deposited sediments could be considered in this judgment analysis from the following guidelines :

Predominant size	Type
Sand or coarser	1
Silt	2
Clay	3

The size of the sediments in most river systems is a mixture of clay, silt, and sand and has been found to be least important in selecting the design type curve from Fig. 3-4. Only for those cases with two possible type distributions should size of sediment be considered in selecting the design type curve. The Lara [35] publication gives the method for distribution upon selection of the appropriate type curve.

The delta or extreme upstream portion of sediment deposits is the most critical part of the longitudinal sediment distribution as it may affect the back-water profile. A detailed delta study is needed when deposition of sediment in the headwater area of a reservoir causes additional inundation of lands or physical features such as bridges or dwellings. A more complete discussion of delta formation is contained in section 5.1.

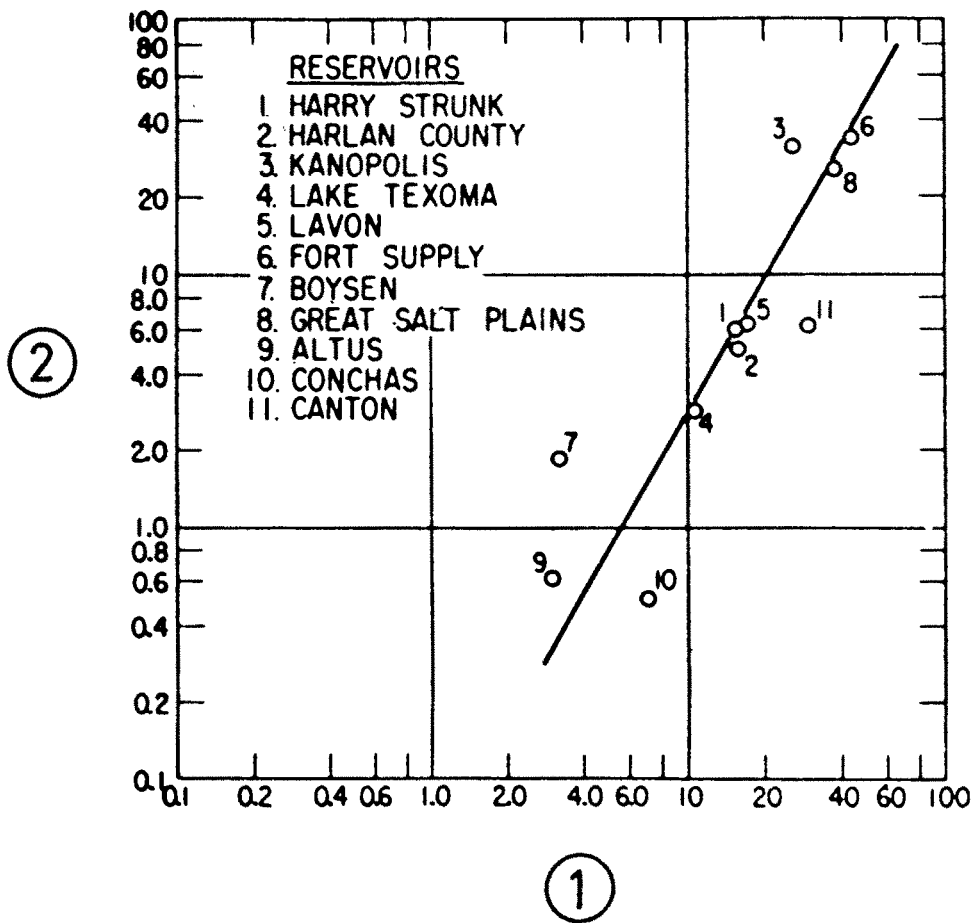


Fig. 3-3

Sediment deposited in flood control pool.

Sédiments déposés dans la tranche de crue.

- (1) Percent of sediment trapped in flood control pool.
- (2) Flood pool index :

$$\frac{\text{Depth of flood pool}}{\text{Depth below flood pool}} \times \text{Percent of time in flood pool}$$

- (1) *Sédiments déposés dans la tranche de crue (en %).*
- (2) *Indice de la tranche de crue :*

$$\frac{\text{Profondeur de la tranche de crue}}{\text{Profondeur sous la tranche de crue}} \times \text{\% du temps passé par le plan d'eau dans la tranche de crue}$$

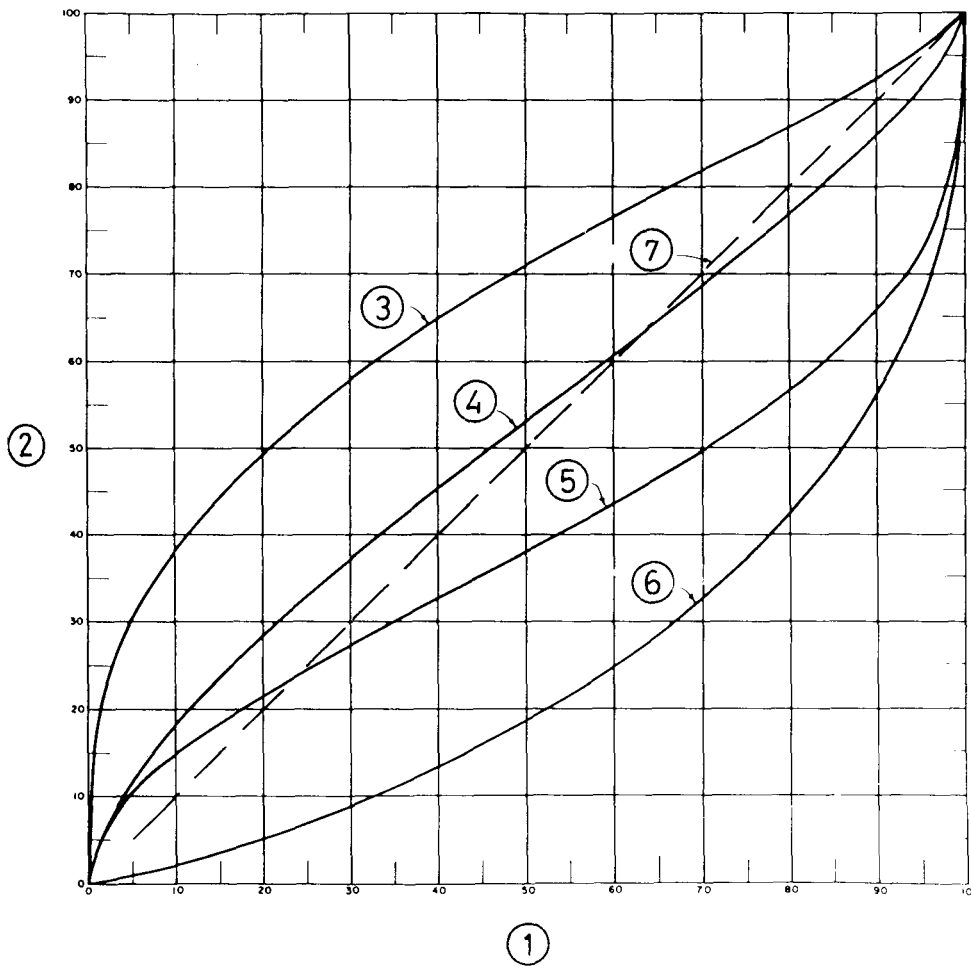


Fig. 3-4

Sediment distribution design curves.

Courbes de calcul de la répartition des dépôts solides.

- | | |
|--|--|
| (1) Percentage of sediment deposited. | (1) <i>Sédiments déposés (en pourcentage).</i> |
| (2) Percentage of reservoir depth. | (2) <i>Profondeur de la retenue (en pourcentage).</i> |
| (3), (4), (5), (6) : Type I, Type II, Type III,
Type IV (normally empty). | (3), (4), (5), (6) : <i>Type I, Type II, Type III, Type
IV (normalement vide).</i> |
| (7) Area-Increment. | (7) <i>Surface, Incrément.</i> |

Tableau 3-1. — Détermination du type de courbe donnant la répartition des dépôts solides.

Exploitation de la retenue		Forme de la retenue		Type pondéré
Classe	Type	Classe	Type	
Sédiments submergés	1	Lac	1	1
		Plaine d'inondation - colline basse	2	1 ou 2
		Colline et gorge	3	2
Vidange modérée	2	Lac	1	1 ou 2
		Plaine d'inondation - colline basse	2	2
		Colline et gorge	3	2 ou 3
Vidange importante	3	Lac	1	2
		Plaine d'inondation - colline basse	2	2 ou 3
		Colline et gorge	3	3
Généralement vide	4	Toutes formes		4

3.4. EFFET DE L'ALLUVIONNEMENT SUR LE PROJET ET LA DURÉE DE VIE DE LA RETENUE

Les principaux facteurs dont dépend l'alluvionnement des retenues, à savoir les apports solides, le taux de rétention de ces apports, la densité des dépôts, le volume des sédiments déposés et la forme prévue de ces dépôts, réduisent la capacité de stockage disponible et affectent donc la durée de vie de la retenue. Comme le montre le paragraphe 3.3 du présent document, les sédiments se répartissent sur toute la profondeur de la retenue, les éléments les plus grossiers se déposant dans le delta et les particules les plus fines près du barrage. C'est cette répartition qui détermine la durée de vie prévue des différentes fonctions d'une retenue.

Dans le cas des grandes retenues à capacité de stockage bien supérieure au volume d'alluvionnement centennal, le seuil de l'ouvrage de vidange le plus bas est généralement placé au-dessus du niveau d'alluvionnement centennal prévu au pied du barrage. La prise en compte de ces problèmes au stade du projet réduit les risques d'obturation des ouvrages de vidange par des corps flottants ou des sédiments. La tranche morte définie lors du projet aura une capacité suffisante pour stocker le volume de sédiments centennal. La durée de vie des différentes tranches d'une retenue, représentées sur la Fig. 3-2, par exemple celle de la tranche utile, peut être prévue à partir d'une série d'études de répartition des sédiments demandant 5 ans d'analyse ou plus.

Dans les régions arides et semi-arides, où le principal objectif de la retenue est le stockage à long terme de l'eau, il n'est généralement pas possible d'utiliser une grande partie du volume d'eau annuel pour chasser des sédiments hors de la retenue.

Table 3-1. — Design curve type for sediment distribution

Reservoir operation		Shape		Weighted type
Class	Type	Class	Type	
Sediment submerged	1	Lake	1	1
		Floodplain-foothill	2	1 or 2
		Hill and gorge	3	2
Moderate drawdown	2	Lake	1	1 or 2
		Floodplain-foothill	2	2
		Hill and gorge	3	2 or 3
Considerable drawdown	3	Lake	1	2
		Floodplain-foothill	2	2 or 3
		Hill and gorge	3	3
Normally empty	4	All shapes		4

3.4. EFFECT OF SEDIMENT ON DESIGN AND STORAGE LIFE

The major factors influencing sediment deposits such as : sediment inflow, trap efficiency, density of deposits, volume of sediment deposited, and prediction of deposit shapes reduce the available storage for water supply and thus affect the life of a reservoir. As shown in section 3.3 of this guideline, sediments are distributed throughout the depth of the reservoir with the coarser sediments deposited in the delta and finer sediments being deposited near the dam. It is this distribution that determines the projected life of the various functions of a reservoir.

For large storage reservoirs with more than adequate capacity for storing the 100-year sediment volume, the invert of the outlet works is usually set above the projected 100-year sediment elevation at the dam. This design consideration thus reduces the chances for plugging of the outlet works by trash or sediment. The dead storage under this design would have adequate capacity to store the 100-year sediment volume. The life of the storage allocation pools such as the conservation storage as shown in Fig. 3-2 can be projected from a series of distribution studies for 5 or more years of analysis.

In arid and semiarid regions where the primary purpose of the reservoir is to provide long-term water storage, it is generally not feasible to bypass a large portion of the annual runoff to flush sediment through the reservoir. Consequently, an

Il faut donc tenir compte, dans le calcul de la capacité totale de la retenue, du volume de sédiments qui devrait s'y déposer au cours de la durée d'exploitation prévue, afin que l'exploitation de la retenue reste économique.

Les retenues situées dans des régions arides ou semi-arides, à apports solides très importants, dont les vannes des pertuis d'évacuation sont utilisées en période de crue, auront une tranche morte faible ou inexistante. Cependant, la durée de vie prévue de ces retenues impose une meilleure analyse de leurs modes d'exploitation, des apports solides et de leurs taux de rétention, des masses volumiques et des formes des dépôts. Dans ces cas-là, des études annuelles peuvent s'avérer nécessaires pour prévoir la vitesse d'accumulation et la forme des dépôts. Dans les cas bien particuliers où les sédiments sont chassés annuellement de la retenue, il faut disposer de davantage de données sur les retenues existantes pour mettre au point des méthodes de prévision fiables.

3.5. CALCUL DES FORCES APPLIQUÉES SUR LES OUVRAGES PAR LES DÉPÔTS SOLIDES

Deux critères fondamentaux sont utilisés pour calculer les forces exercées sur le parement amont d'un barrage par l'accumulation de sédiments. Si la capacité de la retenue a été calculée pour 100 ans d'apports solides et/ou si les sédiments atteignant le barrage ont les dimensions de l'argile et du silt, les forces agissant sur le barrage sont considérées comme identiques à celles exercées par l'eau stockée en amont du barrage. Par contre, s'il est prévu que les matériaux se déposant contre le parement du barrage auront des dimensions supérieures à l'argile et au silt ou des masses volumiques sèches jusqu'à $1\,550\text{ kg/m}^3$, et qu'ils exerceront donc des forces plus importantes sur les ouvrages, il faut en tenir compte dans l'étude du barrage.

3.6. ÉVALUATION DU RISQUE AU NIVEAU DES VIDANGES DE FOND

Les sédiments avançant dans la retenue et finissant par atteindre le parement du barrage peuvent avoir des effets sur le fonctionnement des ouvrages de vidange de fond et, dans certains cas, sur celui de la prise d'eau d'un canal ou d'une usine. C'est ce déplacement des sédiments, accompagnés de corps flottants, qui risque de bloquer les prises d'eau de la centrale, du canal ou l'ouvrage de restitution de la rivière. Un autre problème susceptible de survenir sur des barrages équipés de dispositifs de chasse est l'action abrasive, sur les parois en béton des ouvrages de chasse, du sable ou des autres matériaux de diamètre supérieur à $0,062\text{ mm}$ s'écoulant à vitesse élevée.

Une situation que l'on n'envisage pas toujours lors de l'étude des ouvrages d'évacuation des dépôts est celle survenant pendant la construction du barrage. Au cours de cette phase, de grandes quantités de sédiments, y compris les matériaux grossiers de charriage, vont se déposer en amont du batardeau. Deux problèmes peuvent surgir de ce fait. Tout d'abord, les matériaux charriés par la rivière pendant la période de construction peuvent passer dans les galeries de dérivation provisoire et, par leur action abrasive, en détériorer le revêtement. S'il est envisagé de convertir ultérieurement ces galeries en ouvrages de restitution, il faudra les réparer. Le

adequate allowance must be made within the total design capacity of the reservoir so that the volume of sediment deposition expected during the economic life of the reservoir can be accommodated without destroying the economic viability of the storage scheme.

Reservoirs in arid or semiarid climates, with extremely high sediment inflows and designed with sluice gates to operate during flood flows, will have little or no dead storage pool. However, the projected life of these reservoirs will require a better analysis of operation patterns, sediment inflows, trap efficiencies, densities, and deposition shapes. In these situations, annual studies may be needed for predicting the rate as well as shape of deposits. In those special cases where sediments are annually sluiced through the dam, more data on existing reservoirs are needed to develop reliable predictive methods.

3.5. CALCULATION OF FORCES ON STRUCTURES DUE TO SEDIMENT DEPOSITS

There are two basic criteria being used to calculate the forces acting on the upstream faces of a dam due to sediment accumulation. If the storage reservoir has adequate capacity for the 100-year sediment inflow and/or sediments reaching the dam are clay and silt size particles, the forces are considered to be the same as for water being stored above the dam. The second condition would be where coarser size sediments or sediments reaching a dry density of up to $1\ 550\ \text{kg/m}^3$ could be expected to deposit on the face of the dam. Greater forces based on those higher densities should be considered in the dam design.

3.6. EVALUATION OF RISK AT BOTTOM OF OUTLET STRUCTURES

Sediments moving through the reservoir and eventually reaching the face of the dam can influence both the operation of the outlet structures or in some cases, the operation of a canal or powerplant inlet. It is with this movement of sediment when accompanied by trash or debris, that potential blockage is possible of either the intake to powerplant, canal, or river outlet. Another potential problem for dams designed with sluicing capabilities is the abrasive action that sand or material $> 0.062\ \text{mm}$ moving at high velocities, would have on the concrete surface of the sluicing structures.

A situation that is not always considered in design of outlet structures to handle sediment is that experienced during the construction of the dam. During construction, large quantities of sediment, including the coarser bedload, will deposit above a cofferdam. Two problems may arise because of these deposits. First, the bedload transported by the river during this construction period could move through the bypass or diversion tunnels and abrasive action could damage the tunnel lining. If these tunnels are to be eventually converted to low river outlets, repairs will be necessary. The second problem from deposited sediments above the

deuxième problème posé par l'accumulation de sédiments en amont du batardeau concerne la stabilité de celui-ci et les dispositions prévues pour son enlèvement. Pendant le remplissage initial ou l'exploitation ultérieure de la retenue, des glissements sous l'eau ou des déplacements de sédiments vers les ouvrages de vidange risquent d'obturer ces derniers.

Au fur et à mesure que le volume des dépôts se rapproche de la capacité totale de la retenue, ceux-ci risquent également d'affecter la capacité d'évacuation des déversoirs.

Il est important dans un projet de barrage de considérer les problèmes d'alluvionnement précités. Après évaluation du risque, on peut simplement encourir celui-ci et compter sur un moyen de résoudre ce type de problèmes s'ils se posaient.

cofferdam would depend on stability and plans for removal of the cofferdam. During initial filling of the reservoir, or in subsequent operation of the reservoir, underwater slides or movements of sediments may move into and block the low river outlets.

As reservoirs reach total depletion due to sediment deposition, the deposits may also impinge upon the discharge capability of overflow spillways.

It is important in the design of a dam to consider the above sediment related problems. Upon evaluation of the risk involved it may be possible to merely take a chance and rely upon some remedial action in the event such problems would arise.

4. MAITRISE DE L'ALLUVIONNEMENT

Ce chapitre traite des moyens de surmonter les problèmes d'alluvionnement des retenues en maîtrisant les apports solides de la rivière. (Les mesures de protection destinées à combattre l'érosion et à éviter la pénétration des sédiments dans le réseau hydrographique sont les principaux facteurs de lutte contre l'alluvionnement des retenues. Cependant, ces mesures ne sont normalement pas du ressort des ingénieurs de barrages; aussi ne sont-elles pas traitées ici.)

Afin d'évaluer les différentes mesures de maîtrise de l'alluvionnement, il est nécessaire de comprendre le mécanisme du transport des sédiments à travers les retenues.

4.1. MÉCANISME DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS A TRAVERS LES RETENUES

La concentration en sédiments est souvent le facteur prépondérant dans la détermination du débit solide d'une rivière à un instant donné. Dans ce cas, il n'existe pas une seule et unique relation entre la concentration en sédiments et toute variable représentant la capacité de transport. La Fig. 4-1 montre la dispersion généralement observée en matière de concentration en sédiments des rivières à fort transport solide par suspension. Les 365 points du graphique représentent les valeurs de concentration moyenne mesurée quotidiennement pendant une année calendaire.

Un examen plus attentif de ces données amène à conclure que la concentration en sédiments joue un rôle dominant dans la détermination du débit solide à un instant donné. Après de longues périodes de sécheresse, les premières crues sont généralement fortement chargées en sédiments. Du point de vue de la maîtrise de l'alluvionnement, il est important également de noter que la concentration en sédiments tend à varier beaucoup pendant une crue. Comme l'écoulement initial rencontre davantage de matériaux transportables que les écoulements qui le suivent, la concentration en sédiments a tendance à être bien plus élevée au début de la crue qu'à la fin. Quand on a le choix, il est préférable de commencer le captage aussi tard que possible afin de ne retenir l'eau qu'après diminution sensible de sa teneur en sédiments.

Après la construction d'un barrage sur une rivière et la diminution importante de la capacité de transport solide des débits entrants, on s'aperçoit qu'il n'y a plus qu'une seule et unique relation entre la concentration en sédiments et la capacité de transport solide.

Les Fig. 4-2 et 4-3 [37] représentent les matériaux solides transportés par les débits de crue à travers la retenue de Verwoerd, juste en aval de Bethulie (comparer avec la Fig. 4-1). Bien que cette retenue ait une forme très irrégulière, on constate un rapport bien défini entre la concentration moyenne en sédiments sur une section transversale de la retenue et la valeur minimale de la puissance unitaire du courant (vitesse \times gradient hydraulique), juste en amont de cette section. Comme la capacité de transport solide diminue dans la zone de remous, la situation présentée à la

4. SEDIMENTATION CONTROL

This chapter deals with the control of river-borne sediments in overcoming reservoir sedimentation problems. (Conservation measures to combat erosion and prevent sediments from entering river systems are most important in preventing reservoir sedimentation. However, such measures normally fall outside the control of dam engineers and are not treated here.)

In order to evaluate different control measures, it is necessary to understand the mechanics by which sediment is transported through reservoirs.

4.1. MECHANICS OF SEDIMENT TRANSPORT THROUGH RESERVOIRS

Availability of sediment is often the controlling factor in determining the sediment load of a river at a given instant. In such cases, a singular relationship does not exist between sediment concentration and any variable depicting transporting capacity. Fig. 4-1 illustrates the typical amount of scatter which is observed in the sediment loads of rivers which carry heavy suspended loads. The 365 points depict measured averaged daily concentration values for 1 calendar year.

Closer inspection of such data leads to the conclusion that sediment availability plays the dominant role in determining the sediment load at any instant. The first floods after long dry periods generally are heavily charged with sediment loads. From a sedimentation control viewpoint, it is also important to note that sediment concentrations tend to vary greatly during a single flood event. Because the initial runoff encounters more transportable material than subsequent runoffs, sediment concentrations tend to be much higher during the rising stages of a flood than during the corresponding falling stages. Where the option does exist, it is wise to start impoundment as late as possible so as to trap only water which contains relatively little sediment.

After a dam has been constructed across a river and the sediment transporting capacity of the inflows is severely reduced, a singular relationship is found to exist between sediment concentration and carrying capacity.

Fig. 4-2 and 4-3 [37] depict sediment loads carried by flood-flows through the Verwoerd Reservoir just downstream from Bethulie. (Compare Fig. 4-1.) Although this reservoir is highly irregular in shape, a definite relationship is found to exist between average sediment concentration across a section and the minimum value of the unit stream power (velocity \times gradient) upstream from the section. As the sediment carrying capacity decreases within the backwater zone, the availability control represented in Fig. 4-1 changes into a situation where carrying capacity

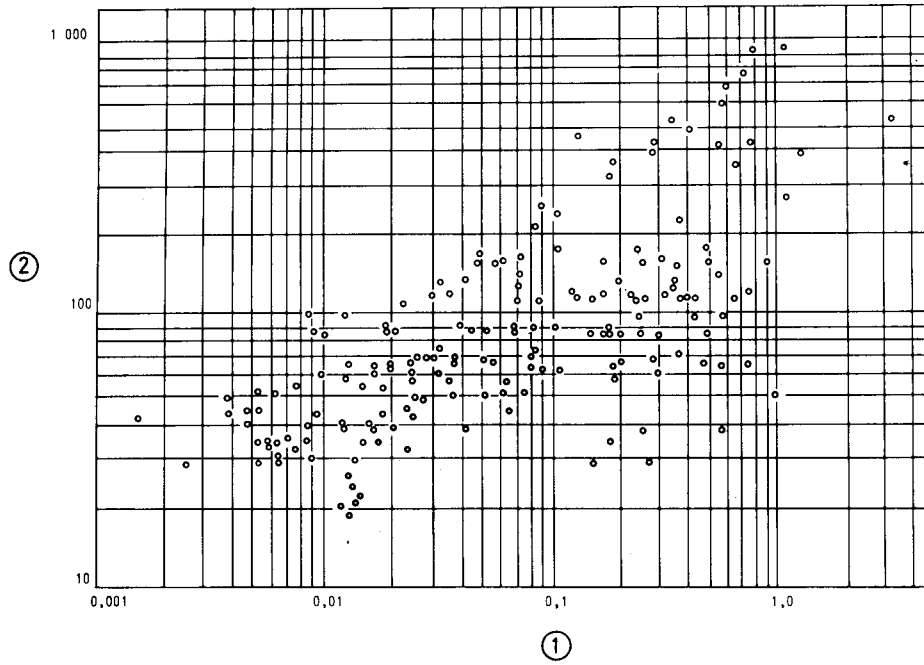


Fig. 4-1

Orange River at Bethulie. Average daily sediment concentration versus discharge values, 1969.

Le fleuve Orange à Béthulie. Concentration moyenne journalière en sédiments en fonction du débit, 1969.

(1) Sediment Concentration : % by mass.

(1) Concentration pondérale en sédiments (%).

(2) Discharge in m^3/s .

(2) Débit en m^3/s .

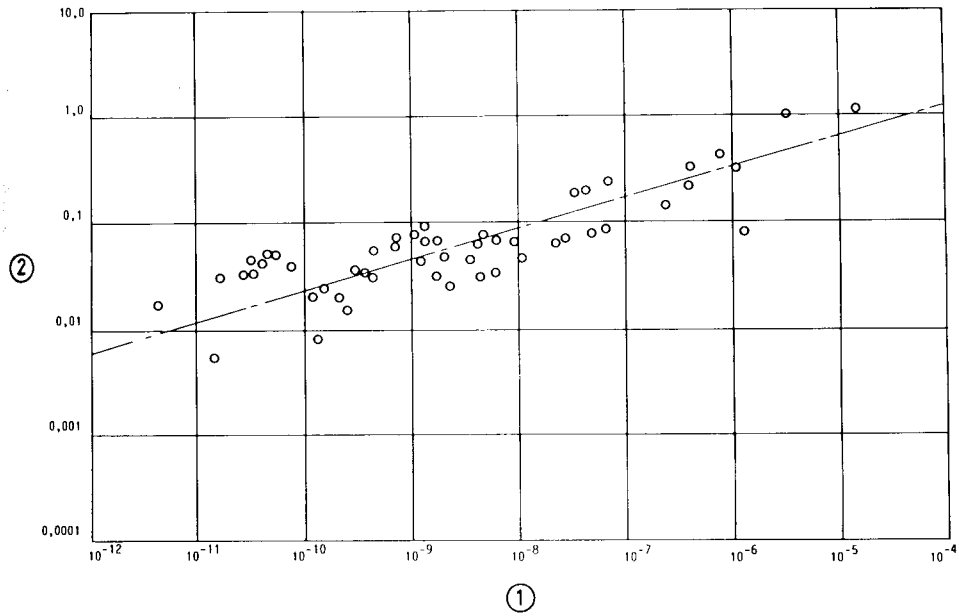


Fig. 4-2

Hendrik Verwoerd Reservoir. Average stream power SV (m/s).

Retenue de Hendrik Verwoerd. Puissance moyenne du courant SV (m/s).

(1) Average stream power SV (m/s).

(1) *Puissance moyenne du courant SV (m/s).*

(2) $\frac{Q_s}{Q}$ (% by mass)

(2) $\frac{Q_s}{Q}$ (% en masse)

= Average Sediment Concentration.

= *Concentration moyenne en sédiment.*

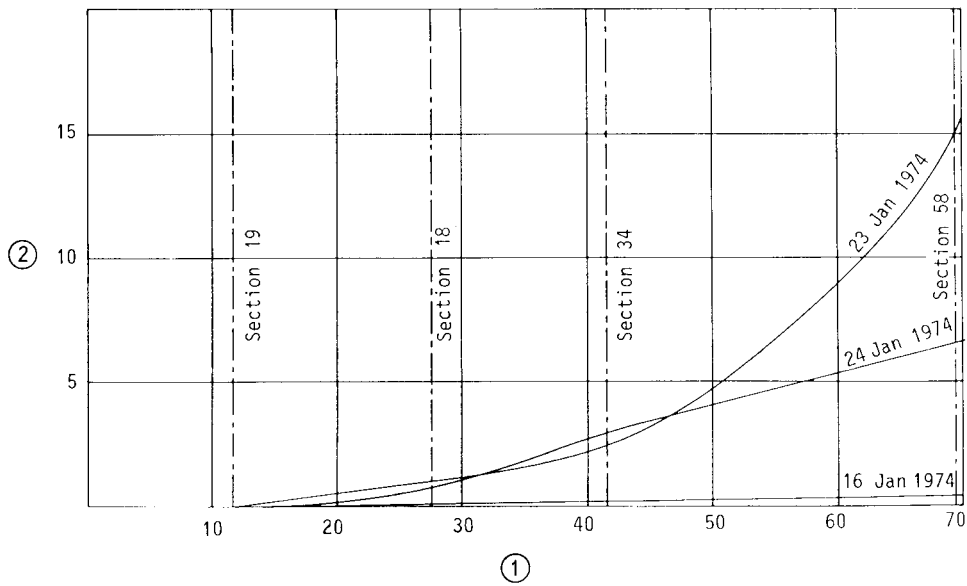
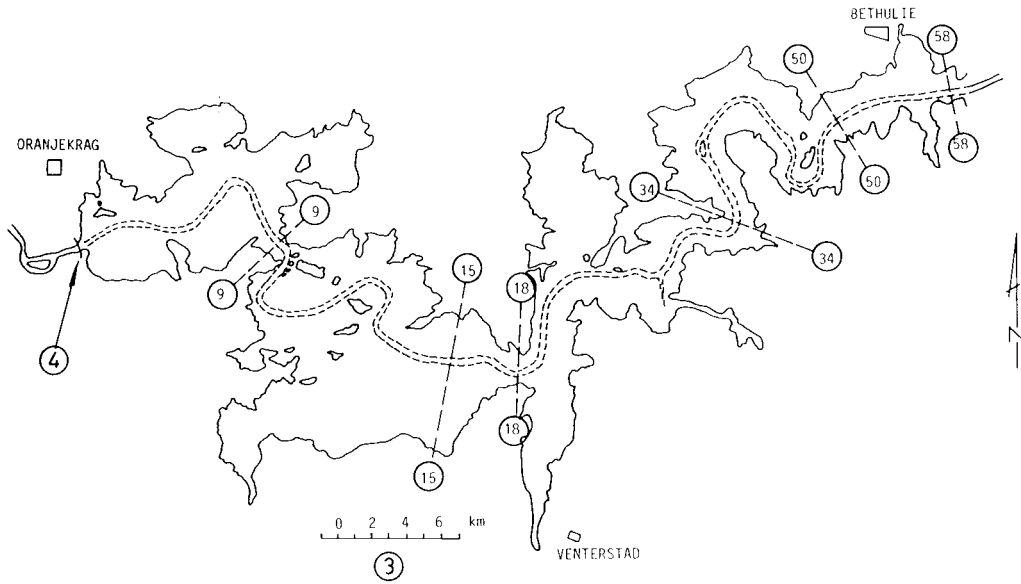


Fig. 4-3

Hendrik Verwoerd Reservoir. Sediment loads versus distance from dam.

Retenue Hendrik Verwoerd. Débit solide total en fonction de la distance comptée à partir du barrage.

- (1) Distance from dam (km).
- (2) Total Sediment load (t/s).
- (3) Scale.
- (4) Dam.

- (1) Distance depuis le barrage (km).
- (2) Débit solide total (t/s).
- (3) Échelle.
- (4) Barrage.

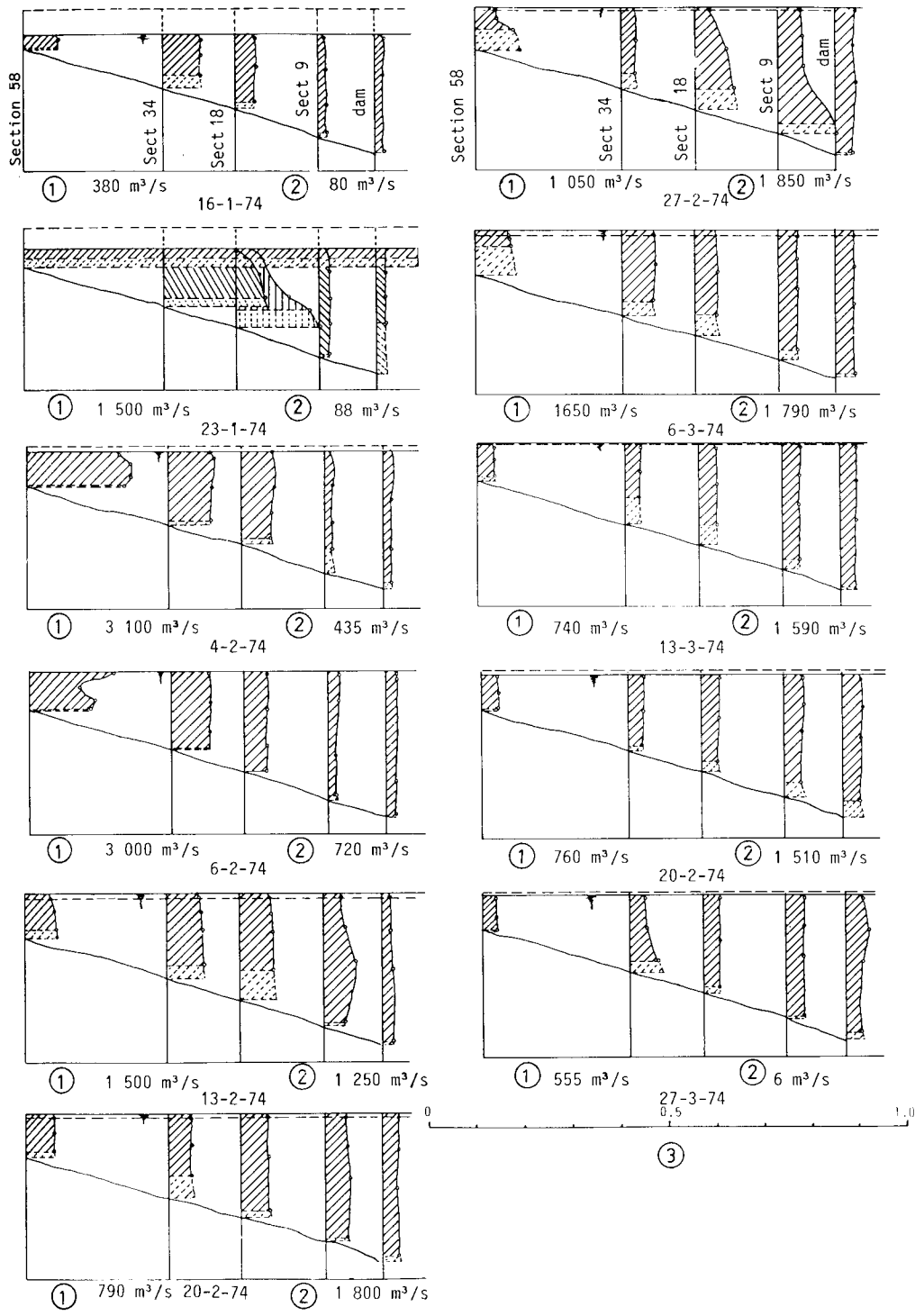


Fig. 4-4

Hendrik Verwoerd Reservoir. Variations in sediment concentration in time and space.

Retenue Hendrik Verwoerd. Variations de la concentration en sédiments dans le temps et l'espace.

(1) Inflow.

(1) Débit entrant.

(2) Outflow.

(2) Débit sortant.

(3) Concentration % by mass.

(3) Échelle des concentrations pondérales en %.

Fig. 4-1 se transforme en une autre situation où la capacité de transport solide devient restreinte (Fig. 4-2). Le débit solide diminue rapidement avec la distance et seuls les matériaux en suspension colloïdale atteignent le barrage (Fig. 4-3).

Si on considère les variations, dans l'espace, de la concentration en sédiments, seules de faibles variations sont observées verticalement et horizontalement aux profils en travers (Fig. 4-4). La faible variation de concentration sur un profil en travers, comme cela se manifeste à la retenue de Verwoerd, dans pratiquement toutes les conditions, est le signe de très fortes turbulences et/ou de suspensions colloïdales.

Dans certaines autres retenues, on observe quelquefois de grandes différences de concentration en sédiments (Fig. 4-5) [38].

De telles différences de concentration sur des verticales d'un profil en travers sont constatées quand des courants de densité, créés par les sédiments, se produisent dans les retenues.

Comme les différents auteurs donnent des sens très variés aux termes décrivant les modes de transport solide, les termes utilisés dans ce chapitre sont définis ci-après.

Suspension colloïdale : suspension de très fines particules discontinues due à une interaction électromagnétique à l'échelle moléculaire. La concentration en sédiments des suspensions colloïdales est déterminée par la présence de fines particules ainsi que par les caractéristiques physiques et chimiques de la suspension.

Les très fines particules (en général de diamètre inférieur ou égal à quelques microns) ont tendance à rester longtemps en suspension, à moins que les forces d'interaction ne soient neutralisées, par exemple là où une rivière chargée de sédiments se jette dans l'océan.

A moins que des courants de densité ne se manifestent, il n'y a pratiquement que les particules transportées en suspension colloïdale qui franchissent les grandes retenues. Généralement, la quantité de particules traversant ainsi la retenue ne représente qu'un faible pourcentage du débit solide entrant dans la retenue.

Suspension par turbulence. Le principal mécanisme de mise en suspension des particules solides s'écoulant dans les rivières et les retenues est la turbulence.

La variation de concentration mesurée sur une verticale d'un profil en travers d'un cours d'eau turbulent peut s'exprimer par l'équation de diffusion bien connue [39].

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D - y}{y} \cdot \frac{a}{D - a} \right)^z \quad (6)$$

dans laquelle :

C : concentration en sédiments à une distance y au-dessus du lit,
 C_a : concentration de référence à une distance a au-dessus du lit,

becomes limiting (Fig. 4-2). The sediment load decreases rapidly with distance and only material in colloidal suspension reaches the dam (Fig. 4-3).

Considering spatial variations in sediment concentration, only slight variations are observed vertically and horizontally at cross sections (Fig. 4-4). The limited variation in concentration across a section as displayed in the Verwoerd Reservoir under practically all conditions are indicative of highly turbulent conditions and/or colloidal suspensions.

In some other reservoirs, large differences in sediment concentrations are sometimes observed (Fig. 4-5) [38].

Such large differences in sediment concentration vertically across a section are found when sediment-induced density currents develop within reservoirs.

As different authors attach widely differing meanings to terms describing modes of sediment transport, these terms are defined for use in this chapter.

Colloidal suspension refers to suspension of very small, discrete particles due to electro-magnetic interaction on a molecular scale. Sediment concentration in colloidal suspensions are determined by the availability of small particles as well as the chemical and physical characteristics of the suspension.

The very small particles (typically up to a few micron in size) tend to remain in suspension for long periods unless the interactive forces are neutralized, e.g., where a sediment-laden river stream enters the ocean.

Unless density currents develop, it is practically only the particles carried in colloidal suspension which pass through large storage reservoirs. Typically, the quantity thus passing through amounts to no more than a few percent of the load which enters the reservoir.

Turbulent suspension. The most important suspension mechanism of sediment particles in river and reservoir flows is turbulent exchange.

Concentration variations vertically through a turbulent stream may be expressed in terms of the well-known diffusion equation [39].

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D - y}{y} \cdot \frac{a}{D - a} \right)^z \quad (6)$$

where :

C : sediment concentration at distance y above the bed,
C_a: reference concentration at distance a above the bed.

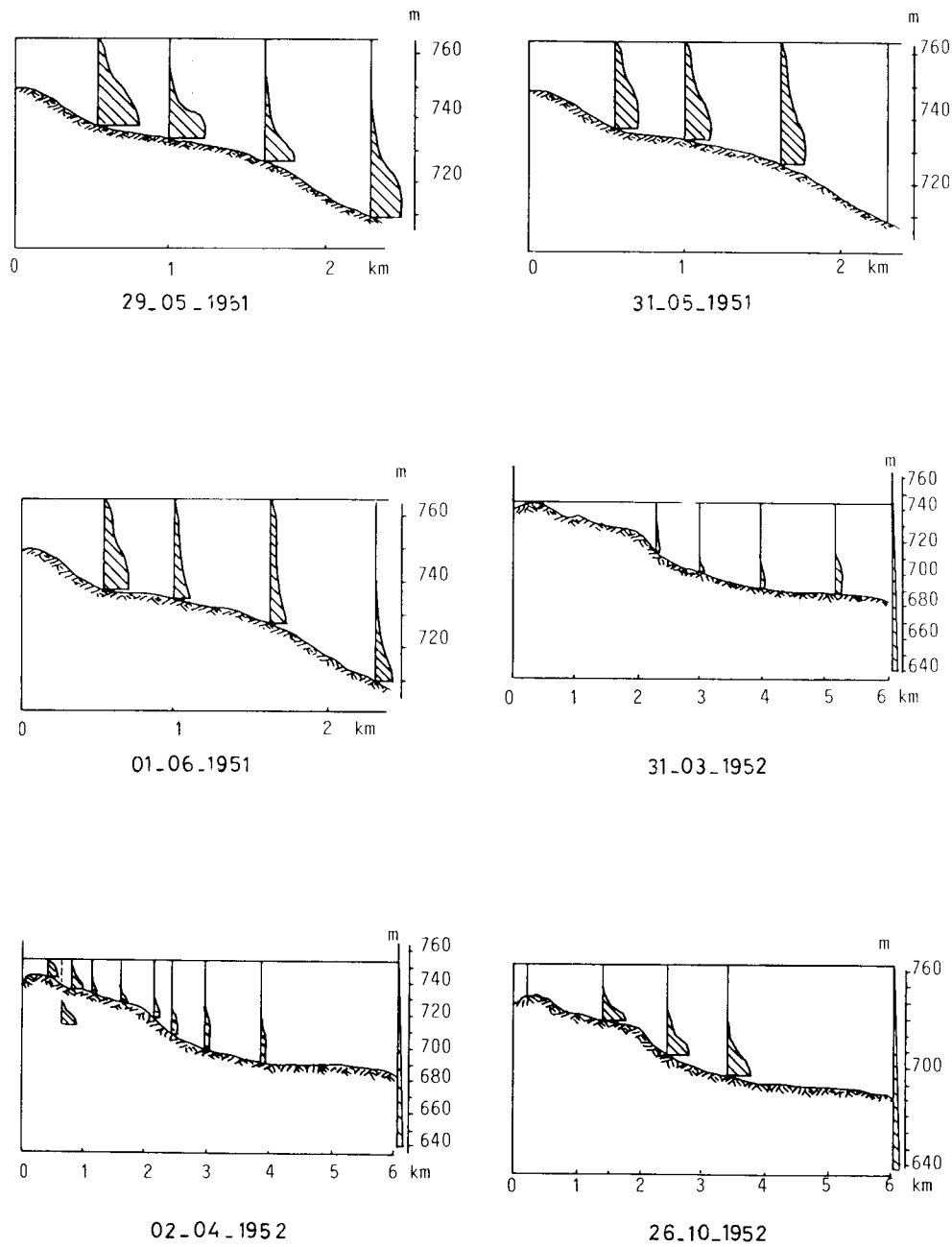


Fig. 4-5

Variations in sediment concentration in time and space (Sautet Reservoir, France).
Retenue du Sautet (France). Variations de la concentration en sédiments dans le temps et l'espace.

$$Z = \frac{V_{ss}}{k \sqrt{gDs}}$$

avec :

V_{ss} : vitesse de décantation des particules,
 k : constante universelle de von Karman [39],
 D : profondeur de l'écoulement,
 s : pente de la ligne de charge,
 g : accélération due à la pesanteur,
ou plus exactement en termes de puissance [40].

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} \cdot \frac{a}{D-a} \right)^z$$

avec :

$$Z = \frac{\frac{5}{6} \sqrt{2} \pi \cdot V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \quad (8)$$

Dans les rivières et les retenues, les écoulements turbulents vont généralement de pair avec des conditions limites de turbulence le long du lit. Dans ces conditions, la concentration des particules en suspension varie comme suit :

Quand les particules en suspension sont relativement petites par rapport à la capacité de transport du cours d'eau :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \rightarrow 0 \right)$$

les concentrations en sédiments varient peu sur une section transversale et on obtient une suspension quasi homogène (exemple, Fig. 4-3).

Quand les particules en suspension sont relativement grandes par rapport à la capacité de transport du cours d'eau :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \rightarrow 8,3 \right)$$

la concentration en sédiments le long du lit devient bien supérieure à la concentration à proximité de la surface et, dans les cas extrêmes, il n'y a transport solide que le long du lit.

Après dépassement de la condition critique :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} > 8,3 \right)$$

le déplacement des solides en suspension par turbulence cesse.

$$Z = \frac{V_{ss}}{k \sqrt{gDs}}$$

with :

V_{ss} : settling velocity of the particles,

k : Von Karman universal constant [39]

D : depth of flow,

s : energy slope,

g : acceleration due to gravity,

or more accurately in terms of power concepts [40].

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D - y}{y} \cdot \frac{a}{D - a} \right)^z$$

with :

$$Z = \frac{\frac{5}{6} \sqrt{2\pi} \cdot V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \quad (8)$$

Turbulent flows through rivers and reservoirs are generally associated with turbulent boundary conditions along the bed. Under these conditions, suspended concentrations vary as follows :

When the suspended sediment particles are small relative to the transporting capacity of the stream :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \rightarrow 0 \right)$$

sediment concentrations will vary little across a section and a nearly homogeneous suspension is obtained (e.g., Fig. 4-3).

In cases where transported particles are very large relative to the carrying capacity of the stream :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} \rightarrow 8.3 \right)$$

sediment concentrations along the bed become much higher than near the surface and in the extreme case sediment particles are transported only along the bed. Once the critical condition is exceeded :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} > 8.3 \right)$$

movement of sediment through turbulent suspension ceases.

La suspension par turbulence, avec de grandes différences de concentration, caractérisée par :

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} > 8,3 \right)$$

ne doit pas être confondue avec les courants de densité.

Courants de densité

Des courants de densité se manifestent quand une couche fluide passe sous une couche de plus faible densité. La discontinuité marquée qui existe entre les couches fluides supérieure et inférieure est la caractéristique des vrais courants de densité. Un exemple classique de variations de concentration liées à des courants de densité induits par les sédiments est celui observé au lac Mead le 3 septembre 1940 [41].

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

Les courants de densité ne peuvent contribuer au transport de quantités importantes de sédiments que lorsque la concentration de ces derniers est élevée à l'entrée dans la retenue. Ceci se produit uniquement quand le débit entrant est élevé et est susceptible de pénétrer profondément dans la retenue. Donc, le rôle des courants de densité ne peut être considéré séparément de celui des écoulements turbulents mais doit être comparé à la suspension par turbulence des sédiments en mouvement.

Les conditions conduisant à la formation de courants de densité peuvent être analysées comme suit [42] :

- s_f : pente de la ligne de charge,
- s_s : pente de la ligne d'eau,
- s_o : pente du lit,
- ρ : masse volumique du fluide supérieur,
- $\rho + \Delta\rho$: masse volumique du courant de densité.

Turbulent suspension with large concentration differences characterized by

$$\left(\frac{V_{ss}}{\sqrt{gDs}} > 8.3 \right)$$

should not be confused with density currents.

Density currents

Density currents develop where a layer of fluid moves in underneath a layer of lower density. The sharp discontinuity which exists between the upper and lower fluids is characteristic of true density currents. A classical example of concentration variations associated with a sediment-induced density current are those observed in Lake Mead on September 3, 1940 [41].

Level (m)	Sediment concentration (percent)
317 (water surface)	—
214.27	0.14
214.12	21.3
213.96	27.0
213.05	28.2
190 (bed)	

Density currents can only be instrumental in transporting significant quantities of sediment while sediment is being introduced in high concentration. This only occurs when inflows into a reservoir are high and such inflows are likely to penetrate deep into a reservoir. The role of density currents, therefore, cannot be regarded in isolation from turbulent flows but must be weighed against that of turbulent suspension in moving sediment.

Conditions which are conducive to the formation of density currents may be analyzed as follows : [42].

- s_f : slope of energy line, ρ : mass density of upper fluid,
- s_s : slope of surface line, $\rho + \Delta\rho$: mass density of density current.
- s_o : bed slope,

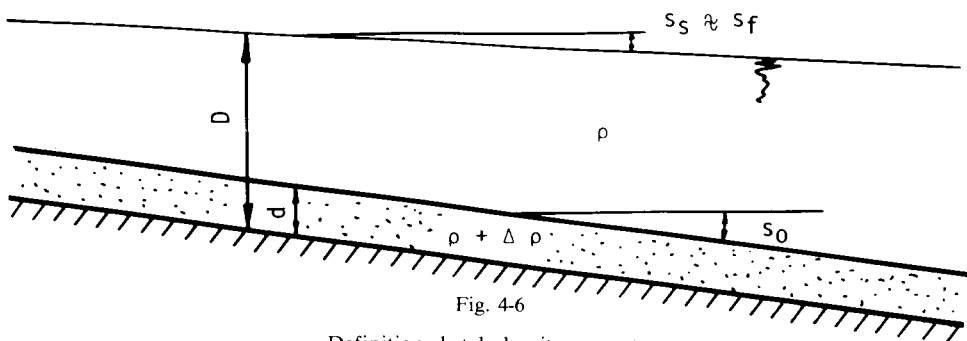


Fig. 4-6
Definition sketch density currents.
Définition schématique des courants de densité.

Considérons un élément fluide de masse volumique $\rho + \Delta\rho$ sous une couche fluide non conforme de masse volumique ρ .

Dans des conditions normales d'écoulement turbulent, l'élément de longueur Δx est poussé en avant par la différence de pression existant au droit de l'élément,

$$\Delta p = \rho g s_s \cdot \Delta x$$

Dans les cas où les courants de densité sont importants, la valeur de s_s est faible et $\cong s_r$. Aussi, la pression « turbulence » sur l'élément, est-elle $\Delta p \cong \rho g s_r \cdot \Delta x$.

Étant donné la différence de densité existante, une différence de pression supplémentaire est créée au droit de l'élément. Cette différence de pression = $\Delta\rho g s_0 \cdot \Delta x$.

Le rapport :

$$\frac{\text{pression « densité »}}{\text{pression « turbulence »}} = \frac{\Delta\rho \cdot s_0}{\rho \cdot s_r}$$

indique l'importance relative des différences de masse volumique dans l'avancement des sédiments à travers les retenues.

Mais :

$$s_r = \frac{v^2}{C^2 R} \text{ (équation de Chézy)}$$

avec :

v : vitesse moyenne d'écoulement,
 C : coefficient de rugosité de Chézy,
 R : rayon hydraulique,
ou :

$$s_r = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} \text{ (équation de Manning)}$$

avec n = (coefficient de rugosité de Manning)

$$\frac{\Delta\rho \cdot s_0}{\rho \cdot s_r} = \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot C^2 R}{\rho v^2} \left(\text{ou } \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot R^{4/3}}{\rho v^2 n^2} \right)$$

Les différences de masse volumique joueront donc un rôle important par rapport aux suspensions par turbulence si la valeur du paramètre :

$$\frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot C^2 R}{\rho v^2} \left(\text{ou } \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot R^{4/3}}{\rho v^2 n^2} \right)$$

est élevée, par exemple dans les cas de :

- a. grandes différences de masse volumique,
- b. grandes profondeurs d'écoulement,
- c. pentes du lit raides,
- d. faibles vitesses d'écoulement.

Des courants de densité se forment principalement dans les grandes retenues, surtout sur la pente raide (frontale) des dépôts, dans la zone du delta de la retenue.

Consider a fluid element with density $\rho + \Delta\rho$ underneath a non-uniform fluid layer of density ρ .

Under normal turbulent flow conditions, the element with length Δx is pushed forward due to a pressure difference which exists across the element,

$$\Delta p = \rho g s_b \cdot \Delta x$$

In situations where density currents are important, the value of s_b is small and $\cong s_f$. The “turbulent” pressure on the element, therefore, $\Delta p \cong \rho g s_f \cdot \Delta x$.

Due to the existing density difference, an additional pressure difference is generated across the element. This pressure difference = $\Delta\rho g s_0 \Delta x$.

The ratio :

$$\frac{\text{“ density ” pressure}}{\text{“ turbulent ” pressure}} = \frac{\Delta\rho \cdot s_0}{\rho \cdot s_f}$$

indicates the relative importance of density differences in the forward propulsion of sediments through reservoirs.

But :

$$s_f = \frac{v^2}{C^2 R} \text{ (Chézy equation)}$$

with :

v : average flow velocity,
 C : Chézy roughness coefficient,
 R : hydraulic radius,

or :

$$s_f = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} \text{ (Manning equation)}$$

with n = (Manning roughness coefficient)

$$\frac{\Delta\rho \cdot s_0}{\rho \cdot s_f} = \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot C^2 R}{\rho v^2} \left(\text{or } \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot R^{4/3}}{\rho v^2 n^2} \right)$$

Density differences will, therefore, play an important role relative to turbulent suspension if the value of the parameter :

$$\frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot C^2 R}{\rho v^2} \left(\text{or } \frac{\Delta\rho \cdot s_0 \cdot R^{4/3}}{\rho v^2 n^2} \right)$$

is high, i.e., in cases of :

- a. large density differences,
- b. large flow depths,
- c. steep bed slopes,
- d. low flow velocities.

Density currents occur mainly in large reservoirs primarily on the steep (foreset) slope of the deposits within the delta portion of the reservoir.

Effondrement des talus

Quand on enlève un organe (par exemple une vanne de pertuis) soutenant des sédiments, la partie frontale des sédiments s'effondre et est précipitée en avant jusqu'à ce que l'équilibre mécanique du sol soit atteint. Les débits solides observés dans ces conditions tendent à être bien supérieurs à ceux obtenus ultérieurement par chasse hydraulique. Il existe également une possibilité de liquéfaction des dépôts solides devant les vannes des pertuis en cas de tremblement de terre.

4.2. DIVERSES MESURES DE MAITRISE DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES

La mesure préventive la plus évidente pour maîtriser l'alluvionnement des retenues est quelquefois négligée par les projeteurs. Les régions supérieures des bassins versants fournissent normalement une grande partie du débit liquide et une plus faible partie du débit solide.

Du point de vue alluvionnement, il peut être avantageux de construire de plus petites retenues plus en amont dans le bassin versant plutôt qu'un seul barrage sur un grand bassin versant.

Autres mesures à considérer :

- a. *captage* des sédiments en amont des retenues,
- b. *dérivation* des apports solides au-delà des retenues,
- c. *traversée* des retenues par les apports solides,
- d. *chasse* des dépôts accumulés dans les retenues,
- e. *enlèvement mécanique* des dépôts existant dans les retenues.

Chacune de ces mesures ne peut être utilisée efficacement que dans certaines conditions.

4.3. CAPTAGE DES SÉDIMENTS EN AMONT DES RETENUES

Il y a bien longtemps que l'homme capte les sédiments des rivières dans un but précis. Zhang Hao *et al.* [44] indiquent :

« Il y a 2 000 ans déjà, les agriculteurs chinois creusaient des canaux de dérivation des eaux chargées de sédiments pour irriguer les terres cultivables. »

Non seulement les sédiments qui se déposaient servaient à fertiliser le sol, mais aussi à aménager des terres cultivables à l'extérieur des digues. Cette technique est connue sous le nom de « colmatage ».

Des « barrages en limon » ont été construits sur une grande échelle en Afrique du Sud, dans des ravins fortement érodés, précisément pour retenir les sédiments. A mesure qu'un delta se forme et s'étend dans le lit du cours d'eau à l'amont du bassin, le volume de sédiments accumulés atteint souvent le double ou le triple de la capacité initiale de la retenue créée.

Malgré leur efficacité en matière de rétention des sédiments, ces ouvrages ne sont pas économiques du point de vue de la capacité de stockage qu'ils permettent de préserver dans les retenues aval (en règle générale, plus la retenue est grande, plus

Collapsing Slopes

When a support (e.g., sluice gate) upholding sediments is removed, the sediment front collapses and rushes forward until soil mechanical equilibrium is reached. Rates of sediment discharge which are observed under these conditions tend to be far in excess of those obtained through subsequent hydraulic flushing. There also exists a potential for liquefaction of sediment deposits in front of sluice gates due to earthquakes.

4.2. ALTERNATIVE MEASURES FOR CONTROLLING RESERVOIR SEDIMENTATION

The most obvious preventative measure in controlling reservoir sedimentation is sometimes overlooked by planners. Upper regions of catchments normally provide a major portion of the runoff and a smaller proportion of the sediment load.

From a sedimentation point of view, it may be advantageous to construct smaller reservoirs higher up in the catchment, rather than to build a single dam with a large catchment area.

Other measures include :

- a. *trapping* sediments upstream from reservoirs,
- b. *bypassing* incoming sediments past reservoirs,
- c. *passing* incoming sediments through reservoirs,
- d. *flushing* accumulated deposits from reservoirs,
- e. *mechanical* removal of existing deposits from reservoirs.

Each of these measures can only be employed meaningfully under certain conditions.

4.3. TRAPPING SEDIMENTS UPSTREAM FROM RESERVOIRS

River sediments have been purposefully trapped for a very long time. Zhang Hao *et al.* [44] report that :

“ As early as 2 000 years ago, the Chinese labouring people were known to have cut canals to divert the sediment-laden water for the irrigation of farm lands. ”

Not only was the deposited sediment used to fertilize the land, but also to build up farmlands outside the dikes. This practice is known as warping.

“ Silt dams ” have been built on a large scale in Southern Africa. These dams are built in deeply eroded gullies specifically to trap sediments. As a delta builds up and extends into the stream channel upstream of the basin, the accumulated sediment volume is often two to three times the initial level pool capacity of the created basin.

In spite of their effectiveness in trapping sediments, these structures are not economical in terms of the storage space that they safeguard in storage reservoirs downstream. (The larger the reservoir, the lower the cost per unit storage volume,

le coût par unité de volume de stockage est faible). On soutient également que les barrages en limon font plus de mal que de bien dans les régions arides car ils empêchent l'arrivée dans les retenues d'une quantité d'eau appréciable.

Ces barrages sont cependant très efficaces pour empêcher la poursuite de l'érosion des ravins, reconstituer les fonds de vallée et rehausser la nappe phréatique.

Si la crête de leurs évacuateurs de crue est trop haute, un delta se crée au-dessus du fond de vallée existant. Il arrive alors que se forment deux nouveaux ravins, de chaque côté du delta. Ces ravins peuvent se tailler un chemin à travers les ailes du barrage en limon. Pour éviter que ceci ne se produise, il est recommandé de placer la crête des évacuateurs à un niveau suffisamment bas pour que les crues de probabilité — 20 ans n'inondent pas les rives du ravin.

La végétation (par exemple des *pragmites australis* et différentes plantes herbacées) a une action très efficace dans la formation des deltas. Les saules et d'autres arbres poussent bien mais tendent à retenir moins efficacement les sédiments car les plantes herbacées ne peuvent pousser sous leur ombre.

Des rideaux de végétation ont également été créés dans les deltas de grandes retenues. Ning Qian [43] indique :

« Dans la retenue de Houghshan, en Chine, on a planté très serrés, dans la zone de remous, des *Scirpus Yagara* et des *Typha Latifolia* qui ont 2 à 3 mètres de haut et forment un rideau de végétation de 4 km de large et 10 km de long, retenant 90 % des apports solides. »

Le cèdre de terrain salifère et le tamaris, plantés dans le sud-ouest des États-Unis, répondent bien eux aussi à cet objet.

Lorsque la végétation devient trop abondante, un nouveau problème peut surgir. Si le rideau de végétation devient trop efficace, il risque d'entraîner des pertes d'eau sérieuses du fait que l'eau est captée à l'amont de la retenue (par exemple, la retenue Elephant Butte, aux États-Unis).

4.4. DÉRIVATION DES APPORTS SOLIDES AU-DELA DES RETENUES

On a construit de nombreuses retenues où la dérivation des sédiments se pratique avec succès.

Dans la plupart des cas, la topographie naturelle est telle que des dispositions peuvent être prises pour dériver les eaux de crue, chargées en sédiments, au-delà de la retenue. La disposition qui donne les meilleurs résultats est celle où les retenues sont construites en dehors des lits mineurs et alimentées sélectivement à partir de la rivière, par l'intermédiaire de canaux d'alimentation.

On peut envisager une autre disposition quand il est possible de dériver une rivière (à méandres) à l'entrée d'une de ses boucles et de constituer la retenue dans cette boucle. Étant donné que les ouvrages de dérivation des crues doivent pouvoir, pour être efficaces, assurer le passage des crues majeures, ce type de dérivation tend à revenir très cher.

Les cas où une dérivation a été effectuée sur toute la longueur de la retenue sont rares. Sur une retenue en Autriche [45], un tunnel de 1,1 km de long a été utilisé à cette fin. Des coûts d'entretien élevés ont rendu ce système inéconomique.

On estime que des systèmes de dérivation de sédiments sur la longueur totale d'une retenue ne peuvent être économiques que dans des conditions très spéciales.

generally speaking.) It is also claimed that silt dams do more harm than good in arid regions as they prevent a significant amount of runoff from reaching storage reservoirs.

These dams are, however, very effective in preventing further gulley erosion and in rebuilding valley floors as well as raising water tables.

If their spillway crests are constructed too high, delta buildup will occur above the existing valley floor. It then easily happens that a pair of new gullies form on either side of the delta. These gullies may cut through the flanks of the silt dam. To prevent this from happening, it is recommended that spillway crests must be low enough for 1 in 20 years floods not to overflow the gulley banks.

Vegetation (e.g., *pragmites australis* and various grass types) is very effective in stimulating delta buildup. Willow and other trees grow well but tend to be less effective in trapping sediments as they prevent growth of grasses in their shades.

Vegetation screens have also been established on the deltas in major reservoirs. Ning Qian [43] reports that :

“ In Houghshan Reservoir in China, *Scirpus Yagara* and *Typha Latifolia* with a height of 2 to 3 m are densely grown in the backwater region, forming a vegetation screen of 4 km wide and 10 km long and trapping 90 % of the incoming sediment. ”

Salt Cedar and Tamarisk grown in the southwestern part of the United States are also good species for this purpose.

If the vegetation grows too profusely, a new serious problem may arise. If the vegetation screen becomes too effective, serious water losses may occur as water is trapped upstream from the storage reservoir, e.g., Elephant Butte Reservoir, USA.

4.4. BYPASSING INCOMING SEDIMENTS PAST RESERVOIRS

Numerous reservoirs have been constructed where bypassing of sediments has been practiced successfully.

In most of these cases, the natural topography is such that provision could be made to divert sediment-laden floodwaters past storage reservoirs. The most successful of these schemes tend to be those where storage reservoirs are built outside main river channels and are fed selectively from the main river through feeder channels.

Another type of facility is found where a (meandering) river can be short-circuited at the neck of a loop with the storage section within the loop. As the flood bypassing facilities have to be capable of passing major floods to be effective, this type of bypassing facility tends to be very expensive.

Cases where bypassing has been performed along a route over the full length of a reservoir are rare. In the case of a reservoir in Austria [45], a tunnel 1.1 km long was used for this purpose. High maintenance costs rendered this system uneconomical.

It is believed that systems for bypassing sediments along the full length of a reservoir could only be economical under very special conditions.

4.5. TRAVERSÉE DES RETENUES PAR LES APPORTS SOLIDES

4.5.1. Introduction

Alors qu'il est possible de chasser des retenues des sédiments sans cohésion longtemps après leur dépôt, il n'en est pas de même des matériaux à forte cohésion. Quand la consolidation des matériaux cohésifs a eu lieu, il devient pratiquement impossible de chasser des retenues des quantités importantes de ces matériaux. S'il faut maîtriser l'alluvionnement, il est indispensable de faire franchir la retenue à un maximum de ces fines particules avant qu'elles ne se déposent en route.

De nombreuses retenues sont exploitées afin de permettre aux sédiments de les franchir, avec plus ou moins de succès. Les trois points essentiels au bon déroulement de l'opération sont :

- a. Un volume d'eau excédentaire suffisant doit être disponible pour assurer la chasse des sédiments.
- b. Les ouvrages de vidange doivent avoir une capacité suffisante pour laisser passer les débits sans dépôt excessif de matériaux cohésifs et/ou chasser les matériaux déposés aux stades appropriés.
- c. Une exploitation judicieuse de la retenue par du personnel ayant une bonne formation est indispensable. Le mode d'exploitation est souvent la partie la plus critique des opérations de chasse des sédiments.

Dans la plupart des cas, les sédiments sont transportés, à travers les retenues, en suspension par turbulence et en suspension colloïdale. Les courants de densité ne sont importants que dans des conditions très spéciales et les (petites) charges colloïdales tendent à être transportées de toute façon.

Généralement, le principal mode de transport des sédiments à travers les retenues est la suspension par turbulence.

4.5.2. Suspension par turbulence

La concentration en sédiments des débits entrants variant considérablement, l'idéal serait de retenir uniquement les eaux relativement peu chargées en sédiments et de laisser passer les eaux très chargées. Zhang Hao *et al.* rapportent que, dans le cas de trois retenues chinoises exploitées initialement sans tenir compte du débit solide, l'introduction de mesures appropriées, pour retenir uniquement les débits entrants contenant une faible concentration de sédiments, a permis de diminuer de plus de 80 % le taux d'alluvionnement.

Les sédiments ne peuvent être évacués efficacement que si les ouvrages de vidange du barrage ont une capacité d'évacuation suffisante. La première question qui se pose est de savoir quelle doit être la capacité d'évacuation à prévoir pour ces ouvrages.

L'idéal serait que les plus fortes crues puissent franchir le barrage sans que celui-ci leur offre de résistance. Malheureusement, ce n'est pratiquement ou économiquement pas possible dans la majorité des cas. A titre de compromis, il a été retenu comme critère que les débits entrants des crues quinquennales doivent pouvoir passer sans déposer une quantité importante de sédiments. Le principe est que les plus grands débits entrants ont tendance à déposer des sédiments mais qu'il

4.5. PASSING INCOMING SEDIMENTS THROUGH RESERVOIRS

4.5.1 Introduction

While it is possible to scour noncohesive sediments from reservoirs long after deposition has taken place, this is not the case with highly cohesive materials. Once consolidation of cohesive materials has taken place, it becomes practically impossible to scour significant quantities of such materials from reservoirs. If sedimentation is to be controlled, it is essential to pass as much of these fine sediments through without deposition taking place enroute.

Numerous reservoirs are operated to pass sediments through with varying degrees of success. The three cardinal aspects of successful operations are :

- a. Enough surplus runoff must be available for sediment emitting releases.
- b. Outlet works must possess sufficient capacity for passing inflows through without excessive deposition of cohesive materials taking place and/or to scour deposited materials at suitable stages.
- c. Judicious operation by properly trained operators is essential. The operational side is often the most critical part of sediment discharge operations.

In most cases, sediment is carried through reservoirs in turbulent and colloidal suspension. Density currents are important only under very special conditions and the (small) colloidal load tends to be carried through in any case.

Generally, the most important transport mode available in passing sediments through reservoirs is that of turbulent suspension.

4.5.2. Turbulent Suspension

With sediment concentrations of inflows varying greatly, the ideal is to trap only relatively sediment-free water and to pass the heavily laden inflows through. Zhang Hao *et al.* [44] report that in the case of three Chinese reservoirs which were initially operated without consideration of sediment loads, decreases of more than 80 percent in sedimentation rates were achieved after the introduction of suitable measures to impound only inflows containing low sediment concentrations.

Sediments can only be passed through effectively if adequate discharge capacity is provided in the outlet works of a dam. The first question which arises is the magnitude of the discharge the outlet works must be designed for.

Ideally, it would be possible to pass the biggest floods through with the dam offering no resistance to the flows. Unfortunately, this is not practically or economically possible in most cases. As a compromise, the criterion has been used that inflows up to the 1 in 5 years flood discharge should be able to pass through without depositing significant quantities of sediment. The proper elevation of the bottom outlet and the necessary water level upstream of the dam should be

faut chasser ces dépôts pendant la même période de crue, avant que la consolidation ne se produise.

Une fois la décision prise sur la crue de projet à considérer, les principales conditions de transport dans la retenue doivent être fixées. Pratiquement, ceci signifie que pour le débit de projet fixé, la capacité de transport solide est calculée sur les profils transversaux les plus critiques de la retenue pour différentes hauteurs d'eau au barrage. On obtient ainsi la hauteur d'eau maximale qui permet aux apports solides d'être transportés d'un bout à l'autre de la retenue. Quand on connaît le débit de projet et la hauteur d'eau au barrage, il est possible de calculer des ouvrages de vidange de capacité d'évacuation suffisante.

Quand les sédiments doivent franchir la retenue, la situation idéale est que le barrage soit en haut d'une chute d'eau ou d'une autre pente raide de la rivière. Dans de tels cas, il est relativement peu coûteux d'assurer une grande capacité d'évacuation.

A moins que la vallée de la rivière ne soit très étroite, les sédiments s'accumulent le long des rives. La largeur effective du lit de la retenue est alors calculée à l'aide de formules du régime.

En se référant aux lits creusés dans des dépôts existants, Zhang Hao *et al.* [44] rapportent que :

« L'expérience acquise lors de l'exploitation de quelques retenues petites et moyennes construites en Chine sur des cours d'eau chargés en sédiments, a montré que la capacité d'évacuation appropriée devait être telle qu'une crue de 20 % à 10 % puisse être maîtrisée par la capacité de stockage du lit mineur sans submersion du lit majeur. »

Il faut souligner une fois de plus que seules les formules qui ont été étalonnées dans des conditions comparables doivent être utilisées pour les calculs de transport solide. Une telle relation (Fig. 4-2) a été établie dans des conditions de crue réelles pour une grande retenue, mais elle ne doit être utilisée que lorsque les particules de sédiments sont relativement petites ($< 0,2$ mm).

Dans des conditions exceptionnelles, des courants de densité induits par les sédiments se produisent et entraînent le transport, jusqu'au pied du barrage, de davantage de sédiments que ce que la relation applicable aux suspensions par turbulence indiquerait. Si les vidanges appropriées sont prévues, les eaux très chargées peuvent être évacuées à travers le barrage.

4.5.3. Courants de densité

La mécanique des courants de densité a été décrite au paragraphe 4.2. Il est rappelé que les conditions sont favorables au développement de courants de densité quand des débits fortement chargés en sédiments entrent dans des retenues profondes dont les lits ont une forte pente. Ceci est confirmé par des expériences en Afrique du Nord où les courants de densité ont été rendus efficaces (sédimentation limitée) dans quelques retenues équipées de petites vannes ouvertes en liaison avec l'observation de l'évolution des courants de densité près du parement amont du barrage [46].

Différents critères ont été avancés pour prévoir l'apparition des courants de densité.

maintained at the same time. The philosophy is that larger inflows would then tend to deposit sediments but that these deposits should be flushed out during the same flood period before consolidation takes place.

Once a decision has been made on the flood design period to be catered for, the critical transporting conditions within the reservoir have to be established. Practically, this means that with the design discharge fixed, the sediment transporting capacity is calculated at the most critical reservoir cross sections for different water stages at the dam. The maximum stage is thus obtained which would permit incoming sediment loads to be carried right through the reservoir. With the design discharge and stage at the dam known, it is possible to design controlled outlet works which provide sufficient discharge capacity.

When sediment is to be passed through a reservoir, the ideal situation for the dam is at the head of a waterfall or other steep river section. In such cases, it is relatively inexpensive to provide high discharge capacities.

Unless the river valley is very narrow, sediment will accumulate along the banks. The effective reservoir channel width is then calculated with the aid of regime formulas.

Referring to channels incised in existing deposits, Zhang Hao *et al.* [44] report that :

“ Experience gained in the operation of some medium and small-sized reservoirs on sediment-laden streams in China has shown that suitable discharge capacity should be such that a 20 % to 10 % flood could be handled by channel storage without inundation of the flood plains. ”

It is stressed once more that only formulas which have been calibrated under comparable conditions should be used for sediment transport calculations. One such relationship (Fig. 4.2) was established under true flood conditions in a major reservoir but should only be used when sediment particles are relatively small (< 0.2 mm).

Under exceptional conditions, sediment-induced density currents will develop which would cause more sediment to be transported up to the dam than the relationships for turbulent suspension would indicate. If suitable outlets are provided, the high concentration stream can be discharged through the dam.

4.5.3. Density Currents

The mechanics of density currents have been described in section 4.2. It is recalled that conditions favorable for the development of density currents exist when heavily charged streams enter deep reservoirs with steep bed slopes. This is borne out by experiences in North Africa where density currents have made for efficient desilting (or have a limited sedimentation) in some reservoirs due to installation of small valves which are opened in accordance with the evolution of density currents observed near the upstream face of the dam [46].

Different criteria have been developed for predicting when density currents will develop.

Ils comprennent :

Paramètre	Source	Remarques
$\frac{v^2}{\left(\frac{\rho_{susp} - \rho}{\rho_{susp}}\right) gh} < 0,6$	[44]	v : vitesse moyenne de l'écoulement, ρ_{susp} : masse volumique du courant de densité, ρ : masse volumique au-dessus du courant de densité, h : profondeur d'eau, s_0 : pente moyenne du lit.
$\frac{v_2}{\left(\frac{\rho_{susp} - \rho}{\rho_{susp}}\right) gh} < 1 \text{ à } 2$	[47]	
$\frac{S_0 C^2 D^3}{Q^2} > 10\,000$	[42]	C : coefficient de rugosité de Chézy, D : profondeur moyenne de la retenue, Q : débit. Version simplifiée du paramètre trouvé en 4.2, supposant que les concentrations en sédiments et les formes des retenues sont identiques.

Il faut noter que tous les critères ci-dessus indiquent automatiquement les conditions favorables à la formation de courants de densité quand la vitesse d'écoulement est faible. Il convient donc d'ajouter qu'ils sont valables uniquement tant que des quantités importantes de sédiments s'introduisent dans la retenue.

Il est nécessaire de recueillir davantage de données sur le déplacement des sédiments par les courants de densité, spécialement pour les retenues où il est important de déplacer les sédiments tout au long des parties basses de la retenue en les chassant à travers le barrage. Une étude de ces courants de densité consisterait à examiner le mouvement des concentrations de sédiments, à localiser ces matériaux en déplacement par rapport à la pente de la zone du delta de la retenue, à connaître les formes du lit du fait de leur incidence sur la turbulence, et les dimensions des sédiments déplacés. De telles données seraient précieuses pour vérifier certains modèles mathématiques utilisés aujourd'hui ou mettre au point quelques relations empiriques facilement applicables. Dans plusieurs retenues plus grandes, dont la capacité de stockage a été prévue pour faire face à 100 ans d'alluvionnement, les courants de densité n'ont pas de grandes applications pratiques car le déplacement des sédiments depuis la zone supérieure des retenues se produit le long du talus frontal jusqu'à la ligne de pente du fond, ou bien dans la zone inférieure de la retenue. Il s'agit uniquement d'un déplacement de sédiments d'un endroit de la retenue à un autre. Comme les dépôts du delta diminuent la capacité de stockage, le mouvement de ces sédiments a plus d'importance dans les derniers stades de leur dépôt. Les courants de densité pourraient alors faire passer davantage de sédiments par des ouvrages de vidange situés plus bas sur le parement du barrage.

Là où des courants de densité se forment et où il est possible de les évacuer à travers le barrage, les lâchures ne doivent pas dépasser le taux de transfert de masse du courant de densité [46].

They include :

Parameter	Source	Remarks
$\frac{v^2}{\left(\frac{\rho_{\text{susp}} - \rho}{\rho_{\text{susp}}}\right) gh} < 0.6$	[44]	v : average flow velocity, ρ_{susp} : mass density of density current, ρ : density above density current, h : fluid depth, S_0 : average bed slope.
$\frac{v_2}{\left(\frac{\rho_{\text{susp}} - \rho}{\rho_{\text{susp}}}\right) gh} < 1 \text{ to } 2$	[47]	
$\frac{S_0 C^2 D^5}{Q^2} > 10\,000$	[42]	C : Chézy roughness coefficient, D : average reservoir depth, Q : discharge. Simplified version of parameter derived in 4.2, assuming that sediment concentrations and reservoir shapes are similar.

It must be noted that all the above criteria automatically indicate conditions favorable for the formation of density currents when the flow velocity is low. The proviso must, therefore, be added that they are only valid as long as significant quantities of sediment are being introduced into a reservoir.

There is a need to collect more data on movement of sediment by density currents, especially for those reservoirs where it is important to move sediment through the lower portions of the reservoir by sluicing of sediments through the dam. Sampling of these density currents would consist of the concentrations of sediment movement, the location of these moving sediments with regard to the slope of the delta portion of the reservoir, bed forms for influence on turbulence, and size of sediments that are being moved. These data would be valuable to verify some of the mathematical models now being used or to develop some easily applicable empirical relationships. For many larger reservoirs that are designed with adequate capacity for 100-year sediment storage, density currents do not have significant practical application because movement of sediment from the upper portion of the reservoirs takes place along the foreset slope to the bottom set slope or into the lower portion of the reservoir. This is only a shifting of sediments from one location within a reservoir to another location. As the delta deposits encroach upon the storage capacity, the movement of these sediments is more critical in the later stages of sediment deposition. Density currents could then move more sediments through an outlet works located at a lower elevation at the face of the dam.

Where density currents do develop and can be passed through dams, releases should not be in excess of the mass transfer rate of the density current [46]. The reason being that larger discharge rates could cause turbulent interaction to

La raison en est 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.

4.6. CHASSE DES DÉPÔTS ACCUMULÉS DANS LES RETENUES

Il est possible de chasser les sédiments accumulés dans les retenues si on peut créer une capacité de transport suffisante. Ceci implique, là encore, qu'on dispose d'un excédent d'eau suffisant pour cette opération d'évacuation et qu'on puisse créer des courants capables d'entraîner les sédiments déposés.

Ning Qian [43] a dressé un tableau des valeurs de concentration ayant été enregistrées pendant des opérations de chasse.

Rapport eau-sédiments évacués suivant différents modes de chasse et de dragage par aspiration (d'après Ning Qian, 1982)

Retenue	Pays	Mode opératoire	Rapport eau/sédiments évacués
Moyenne de six retenues de chute moyenne	URSS	Vidanges de fond et abaissement du plan d'eau	En général, 30 à 50 Maximum, 100
Grimsel	Suisse	Vidanges de fond et abaissement du plan d'eau	20 à 50
Gebidem	Suisse	Vidanges de fond et abaissement du plan d'eau	42
		Sans abaissement du plan d'eau	18
Retenues dans les Alpes	Autriche	Combinaison de chasse, abaissement du plan d'eau et dragage par aspiration	17 à 20
Nebeur	Tunisie	Chasse par vidanges de fond avec abaissement du plan d'eau et décharge par courants de densité	9
Tianjiawan	Chine	Dragage par aspiration avec de fortes concentrations	6,4

Il est intéressant de noter qu'en l'absence de courants de densité ou d'enlèvement mécanique, les niveaux de concentration habituels des débits passant dans les ouvrages de vidange sont du même ordre de grandeur que ceux constatés pendant les crues sur de nombreuses rivières dans le monde. Ceci prouve à nouveau qu'en règle générale, les opérations de chasse exigent un fort pourcentage du volume d'eau entrant.

dominate in the transport mechanism. As a result, mixing and dilution would take place.

4.6. FLUSHING ACCUMULATED DEPOSITS FROM RESERVOIRS

Sediments trapped within reservoirs can be flushed out if sufficient transporting capacity can be generated. This, once again, implies that adequate excess runoff must be available for flushing operations and that flows capable of entraining the deposited sediments must be generated.

Ning Qian [43] has compiled a table of concentration values which have been recorded during flushing operations.

Flushing water-detritus ratio in adopting different modes of flushing and suction dredging (From Ning Qian, 1982).

Reservoir	Location	Modes of operation	Water detritus ratio
Average of six reservoirs of medium head	USSR	Bottom outlets, drawing down of water level	General 30-50, maximum 100
Grimsel Res.	Switzerland	Bottom outlets drawing down of water level	20-50
Gebidem Res.	Switzerland	Bottom outlets, drawing down of water level	42
		Without drawing down of water level	18
Reservoirs in Alps region	Austria	A combination of flushing while drawing down the water level and suction dredging	17-20
Nebeur Res.	Tunis	Bottom outlets flushing with drawing down of water level and venting by density current	9
Tianjiawan Res.	China	Suction dredging with high concentrations	6.4

It is interesting to note that in the absence of density currents or mechanical removal, typical values of concentrations passing through outlet works are of the same order as those encountered during floods in many rivers of the world. This again proves that typically, a major percentage of inflow volumes is required for flushing operations.

Quand on dispose d'un excédent d'eau suffisant pour ces opérations de chasse, il faut créer une capacité de transport suffisante pour évacuer les sédiments.

Le premier critère à satisfaire est que la capacité de transport du courant de chasse doit dépasser la valeur critique des sédiments à évacuer. Dans le cas de matériaux sans cohésion, des formules relativement simples définissent la condition critique [48].

D'après la Fig. 4-7, si :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{v} \cdot d_{50} > 13$$

(Couche limite turbulente, généralement trouvée dans les retenues)

le transport solide aura lieu quand :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} > 0,12$$

et si :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} \cdot d_{50} < 13$$

(Couche limite laminaire, rarement trouvée dans les rivières et retenues)

le transport solide aura lieu si :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} > \frac{1,6}{\frac{\sqrt{gDs_f} \cdot d_{50}}{v}}$$

où :

g : accélération due à la pesanteur,

D : profondeur de l'écoulement,

s_f : pente de la ligne de charge = $\frac{v^2}{C^2R}$ (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,

d_{50} : dimension moyenne des particules solides,

V_{ss} : vitesse de décantation des plus grosses particules à évacuer.

Ces formules s'appliquent aux particules non consolidées. On dispose de certaines informations sur l'effet de la consolidation dans les rivières. Partl [49] indique que s'il faut une contrainte de cisaillement de 0,3 kg/m² (3 N/m²) pour les dépôts récents, il faut 0,5 kg/m² (5 N/m²) pour évacuer les mêmes matériaux après leur consolidation. Dans le cas des particules lamelliformes de schiste, rencontrées dans tout le cours de l'Isère, il faut des vitesses de l'ordre de 1,2 à 1,3 m/s pour entraîner à nouveau ces particules après leur dépôt. Cependant, ce dernier ne se produit que lorsque la vitesse du courant tombe au dessous de 0,4 à 0,5 m/s.

With adequate excess runoff available for flushing operations, sufficient transporting capacity must be generated to remove the sediment.

The first criterion that has to be met is that the transporting capacity of the flushing stream must exceed the critical value of the sediments that are to be removed. In the case of cohesionless sediments, relatively simple relationships define the critical condition [48].

From Fig. 4-7, if

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{v} \cdot d_{50} > 13$$

(Turbulent boundary layer, generally found in reservoirs)

then sediment transport will take place while :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} > 0.12$$

and if :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} \cdot d_{50} < 13$$

(Laminar boundary layer, rarely found in rivers or reservoirs)

then sediment transport will take place if :

$$\frac{\sqrt{gDs_f}}{V_{ss}} > \frac{1.6}{\frac{\sqrt{gDs_f} \cdot d_{50}}{v}}$$

where :

g : acceleration of gravity,

D : depth of flow,

s_f : energy slope = $\frac{v^2}{C^2R}$ (Chézy)

or = $\frac{v^2n^2}{R^{4/3}}$ (Manning)

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

d_{50} : median particle size of sediments,

V_{ss} : settling velocity of largest particles to be removed.

These relationships are valid for unconsolidated particles. Some information is available on the effect of consolidation in rivers. Partl [49] reports that while a shear stress of 0.3 kg/m² (3 N/m²) is required for fresh deposits, 0.5 kg/m² (5 N/m²) is required to remove the same materials after accumulation has taken place. In the case of flaky schist particles encountered along the Isere River, velocities in the order of 1.2 to 1.3 m/s are required to reentrain these particles after deposition has taken place. Deposition of these particles, however, takes place only when flow velocities drop below 0.4 to 0.5 m/s.

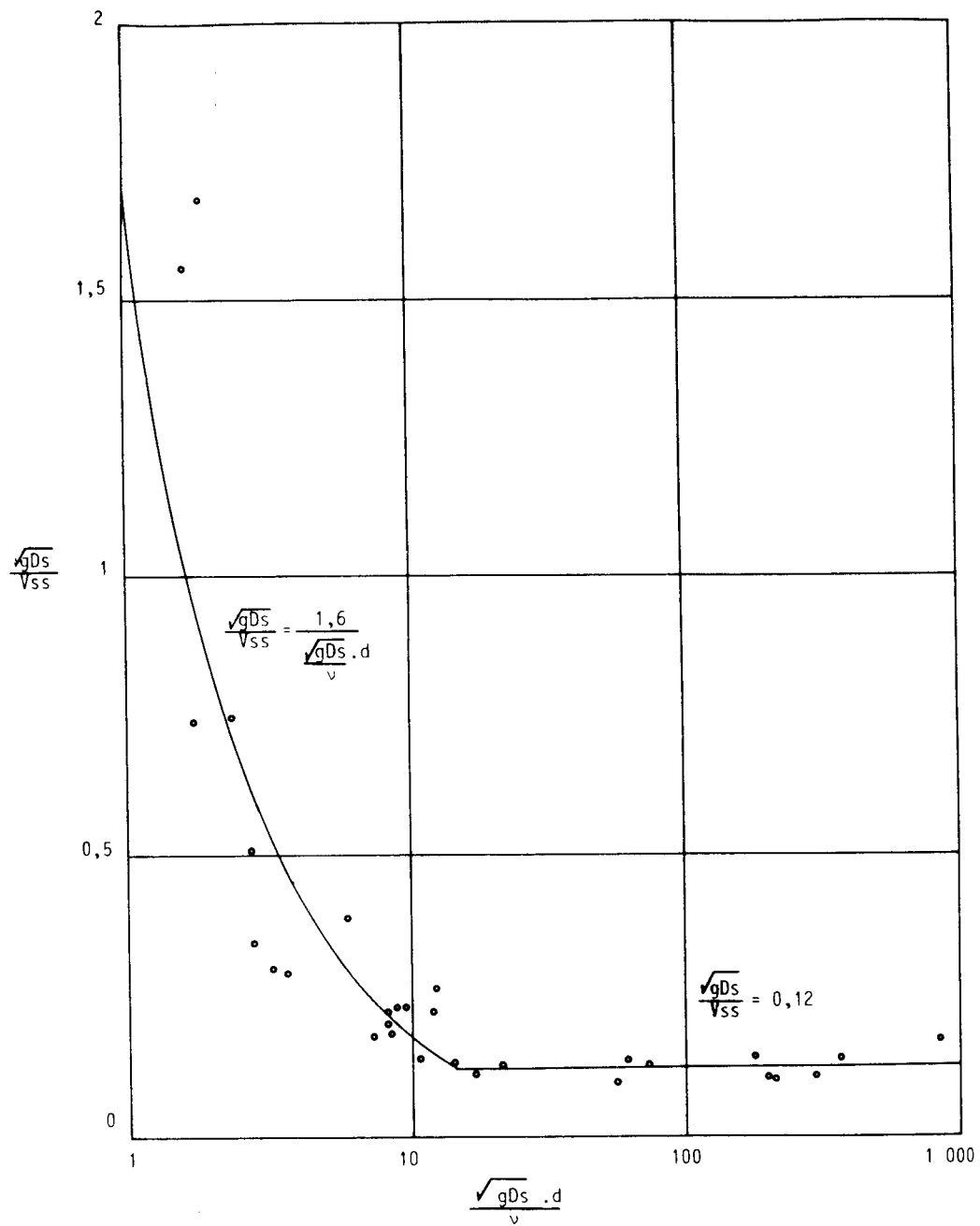


Fig. 4-7

Critical conditions for cohesionless sediment.
Conditions critiques pour des sédiments sans cohésion.

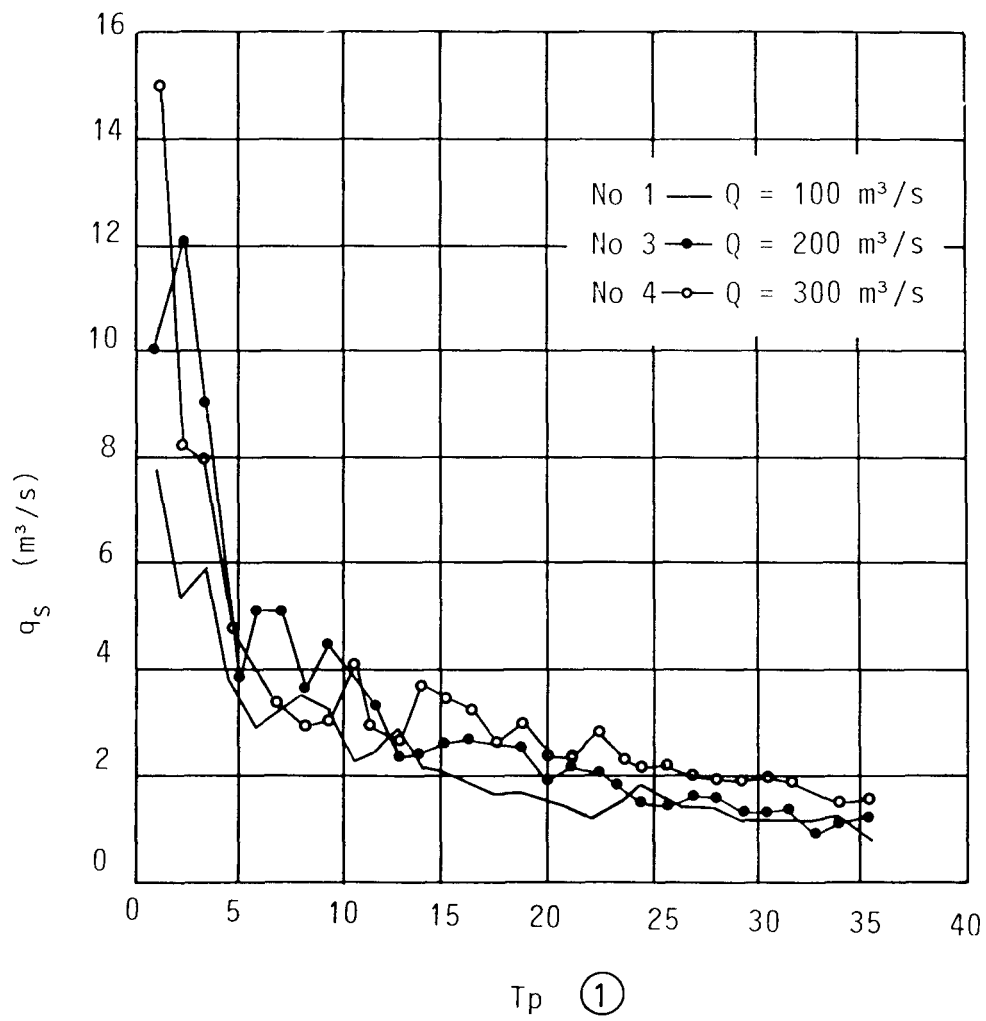


Fig. 4-8

Change of sediment discharge with time.
 Modification du débit solide en fonction du temps.

(1) Hours

(1) Heures.

Ces valeurs indiquent que pour les matériaux sans cohésion consolidés, la valeur de gDs , donnée par la Fig. 4-7 ou par des graphiques identiques, doit être doublée ou triplée pour s'assurer que la chasse des dépôts aura bien lieu. Pour déterminer les quantités de sédiments qui seront chassés par différents débits, il faut utiliser des formules de débit solide telles que celles présentées par Graf [50].

La comparaison des différentes formules de débit solide laisse apparaître des résultats très variés; aussi est-il essentiel d'utiliser une formule ayant été étalonnée dans des conditions comparables. La relation représentée par la Fig. 4-2 a été établie pour une grande retenue où de fines particules solides sont transportées et elle devrait s'appliquer ailleurs pour des conditions semblables.

Takasu [51] donne une formule ayant été utilisée au Japon pour calculer la capacité de transport dans des retenues beaucoup plus petites où les sédiments sont bien plus grossiers. Il est indiqué que cette formule donne une évaluation prudente pour ce type de calculs. Comme elle a été testée dans les conditions d'une retenue, elle devrait être plus fiable que la plupart des autres formules de débit solide.

Cette formule, dite de Brown, s'exprime comme suit :

$$Q_B = 10 g^{1/2} n^{3/2} Q^{3/2} S_f^{7/4} B_n^{-1/2} d^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)$$

où :

Q_B : débit solide (m^3/s),

g : accélération due à la pesanteur ($9,8 m/s^2$),

n : coefficient de rugosité de Manning ($s/m^{1/3}$),

Q : débit de l'eau (m^3/s),

s_f : pente de la ligne de charge,

B_n : largeur de la section (m),

d : dimension moyenne des particules (m),

ρ_s : masse volumique des sédiments (en général $2\ 650 kg/m^3$),

ρ : masse volumique de l'eau ($1\ 000 kg/m^3$).

Dans le cas où un chenal se serait formé à travers les dépôts de sédiments, Takasu recommande une formule du régime pour calculer la largeur du chenal :

$$B_n = \alpha Q^{1/2} \quad (B_n \text{ en m, } Q \text{ en } m^3/s)$$

où : $5 \leq \alpha \leq 7$.

4.7. EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES OUVRAGES D'ÉVACUATION DE SÉDIMENTS

Quelles sont les valeurs des débits solides effectivement chassés des retenues? La Fig. 4-8 [51] donne les résultats d'essais sur modèles et illustre clairement comment le débit d'évacuation des sédiments diminue souvent avec le temps.

Immédiatement après ouverture des vannes d'évacuation des sédiments, le débit initial d'évacuation peut être très élevé, particulièrement si le talus frontal des sédiments s'effondre. Ultérieurement, la pente initialement très raide de la ligne de charge diminue avec le temps, ce qui s'accompagne d'une diminution des débits solides, tendant finalement vers l'équilibre.

These values indicate that for consolidated noncohesive materials, the value of γ/gDs , as obtained from Fig. 4.7 or similar diagrams, should be doubled or trebled to ensure that scour will take place. To establish the quantities that will be scoured by different discharges, use has to be made of sediment load formulas such as those presented by Graf [50].

Different sediment load formulas give widely varying results when compared, and it is, therefore, essential to use a formula which was calibrated under comparable conditions. The relationship in Fig. 4-2 has been established on a major reservoir with fine sediments being transported and should be valid under similar conditions elsewhere.

A formula which has been used for calculating sediment transporting capacity in much smaller reservoirs in Japan where the sediment is much coarser is given by Takasu [51]. The formula is said to give conservative results for this type of calculations. As it has been tested under reservoir conditions, it should be more reliable than most other sediment load formulas.

This so-called Brown formula reads :

$$Q_B = 10 g^{1/2} n^{3/2} Q^{3/2} S_f^{7/4} B_n^{-1/2} d^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)$$

with :

- Q_B : sediment discharge (m^3/s),
- g : acceleration of gravity ($9.8 m/s^2$),
- n : Manning roughness coefficient ($s/m^{1/3}$),
- Q : water discharge (m^3/s),
- S_f : energy slope,
- B_n : section width (m),
- d : mean particles size (m),
- ρ_s : sediment mass density (typically $2\ 650\ kg/m^3$),
- ρ : water mass density ($1\ 000\ kg/m^3$).

In cases where a channel is formed through the sediment deposits, Takasu recommends a regime formula for calculating the channel width :

$$B_n = \alpha Q^{1/2} \quad (B_n \text{ in m, } Q \text{ in } m^3/s)$$

with : $5 \leq \alpha \leq 7$

4.7. OPERATION AND MAINTENANCE OF SEDIMENT RELEASE FACILITIES

At what rates are sediments actually flushed from reservoirs? Fig. 4-8 [51] depicts the results of model tests and clearly illustrates how the sediment discharge rate often decreases with time.

Immediately after sediment releasing gates are opened, the initial sediment discharge rate may be very high, especially while the sediment front collapses. Subsequently, the very steep initial energy gradient decreases with time with accompanying decreases in sediment discharge, eventually tending towards equilibrium.

Pour chasser les sédiments d'une retenue aval, on peut procéder à des lâchures à partir d'une retenue amont. Un exemple de ce mode d'exploitation est fourni par les retenues de Jiaojiazhuang [44], situées à 2 km l'une de l'autre. La retenue amont est exploitée de façon à ne retenir que des débits entrants faiblement chargés alors que la retenue aval retient la majeure partie des sédiments qui s'y jettent. Il est procédé de temps en temps à des lâchures d'eau de la retenue supérieure pour chasser les sédiments de la retenue inférieure.

Dans le cas du Rhône, 400 000 m³ de sédiments sont évacués simultanément à travers trois retenues successives [46].

Il faut faire particulièrement attention à ce que les vidanges ne s'obstruent pas entre les opérations. Leur réouverture se révèle très difficile et coûteuse [46, 52].

En raison des grandes vitesses d'évacuation en cause et de la nature abrasive des sédiments, les ouvrages de vidange sont soumis à une forte abrasion. On a utilisé avec beaucoup de succès, dans le passé, des revêtements en granit pour éviter une abrasion sérieuse alors qu'on emploie aujourd'hui de plus en plus de revêtements en époxy.

Les revêtements en acier ordinaire n'ont pas donné de bons résultats dans la lutte contre l'abrasion, mais un revêtement d'acier recouvert d'une couche d'acier inox s'est révélé plus efficace [46]. Après une usure supplémentaire, des couches de résine époxy ont été appliquées ultérieurement. Le lecteur est prié de se référer à la publication mentionnée ci-dessus, qui contient un certain nombre d'études intéressantes de cas.

4.8. DRAGAGE DES DÉPÔTS SOLIDES

Tout le monde est d'accord, semble-t-il, pour admettre qu'il n'est pas économique de récupérer par dragage une capacité de stockage dans les grandes retenues.

On estime généralement que le coût de surélévation d'un barrage ou de construction d'une nouvelle retenue, quand c'est possible, est moins élevé, par unité de volume de stockage, que le coût unitaire du dragage.

Murray [53] relate certains des problèmes concernant les opérations de dragage. L'un des plus sérieux est généralement celui que pose l'évacuation des matériaux dragués.

Ce type d'opération s'est donc limité aux petites retenues pour lesquelles la capacité de stockage est primordiale ou à l'élimination de dépôts bien localisés dans les retenues.

On peut avancer que cette façon de considérer le dragage sous-estime les possibilités de mise au point d'équipements et de méthodes sur mesure. Les professionnels du dragage procèdent rarement autrement et, en fait, chaque projet de dragage est une association unique de facteurs : propriétés du sol, profondeur d'eau, environnement, contraintes logistiques. Il s'ensuit que dans l'industrie du dragage, la recherche et le développement sont largement orientés vers les projets envisagés et ont atteint un haut niveau de sophistication.

On peut se demander si ces possibilités ont bien été pleinement utilisées pour rechercher des solutions économiques de dragage des retenues et résoudre des problèmes majeurs tels que l'évacuation des déblais. A ce sujet, les techniques

Releases from an upstream reservoir may be utilized to flush sediments from a downstream reservoir. An example of this type of operation is found at the Jiaojiazhuang reservoirs [44] which are 2 km apart. The upstream reservoir is operated so as to impound only inflows with low sediment content while the lower reservoir traps much of the sediments which pass through. Water releases from the upper reservoir are used to flush sediments from the lower reservoir from time to time.

In the case of the Rhone River, 400 000 m³ of sediment is flushed simultaneously through three successive reservoirs [46].

Special care must be taken to prevent outlets from being blocked in between operations. Reopening proves to be very difficult and costly [46, 52].

Due to the high discharge velocities that are involved and the abrasive nature of the sediments, outlet works are subject to severe abrasion. Granite linings have, in the past, been used very successfully in preventing serious abrasion while epoxy linings are coming into use more and more.

Ordinary steel linings have not been very successful in overcoming abrasion problems but a steel lining, covered with a layer of stainless steel proved to be more successful [46]. Subsequent resin coatings have been applied after additional wear. The reader is referred to the publication mentioned above for a number of useful case studies.

4.8. DREDGING OF SEDIMENT DEPOSITS

There seems to be general consensus that it is not economical to recoup storage space in major storage reservoirs through dredging operations.

The costs of raising a dam or constructing a new storage reservoir, if possible, are generally believed to be lower per unit volume storage than the unit dredging costs.

Murray [53] refers to some of the problems which are involved in dredging operations. One of the biggest problems generally involves the disposal of the dredged material.

Applications on reservoirs have been limited to small reservoirs where storage space is at a premium or to alleviate problems caused by localized deposits in reservoirs.

It may be postulated that this impression of dredging underestimates the potential of designing tailor-made equipment and operations. The dredging industry seldom does otherwise, in fact, each dredging project is a unique combination of factors : soil properties, water depth, environment, and logistics constraints. As a consequence, research and development in the dredging industry is strongly project oriented and has reached a high level of sophistication.

Some doubt may be expressed whether this potential has been fully exploited to find economical solutions to reservoir dredging and to solve major problems such as spoil disposal. In this regard, spoil disposal techniques aimed at maximum

d'évacuation des déblais, destinées à utiliser au maximum le volume de stockage disponible et à aménager simultanément des terres pouvant prendre beaucoup de valeur, ne semblent pas avoir été considérées convenablement dans les méthodes d'évaluation.

Chaque aspect du dragage des retenues — grande profondeur; sédiments consolidés; matériaux entraînés tels que roches, graviers, troncs d'arbres, règles sévères de mise en décharge des matériaux — a déjà été examiné au cours d'opérations de dragage, et cette expérience a permis déjà d'acquérir un grand nombre de connaissances.

Il convient donc de retenir le dragage, tout autant que les autres mesures déjà mentionnées, comme moyen de surmonter les problèmes d'alluvionnement des retenues.

utilization of available storage volume and simultaneously at creating land with high value application do not seem to have been adequately considered in the evaluation processes.

Each aspect of reservoir dredging — large depth; consolidated sediment; entrained material such as rocks, gravels, tree trunks; severe disposal limitations — has already been experienced at dredging operations elsewhere and a great deal of knowledge gained from these experiences is readily available.

Consideration should therefore be given to dredging as well as the other measures mentioned in overcoming reservoir sedimentation problems.

5. EFFETS SECONDAIRES

En plus des principaux effets physiques du dépôt des alluvions dans les retenues sur les fonctions demandées à ces retenues, plusieurs effets secondaires peuvent se manifester bien au-delà des limites de la retenue ou influencer sur des points qui ne faisaient pas partie de ses principales fonctions. Dans la mesure où ces effets améliorent ou diminuent les services escomptés de la retenue, il faut les évaluer et en tenir compte lors de la conception, de l'étude et de la construction de la retenue.

5.1. DÉFORMATION DU LIT DE LA RIVIÈRE

On peut s'attendre à ce que le lit du cours d'eau entrant soit surélevé par remblaiement par suite de l'effet du remous sur la capacité de transport solide du cours d'eau. A mesure que le delta de la retenue s'agrandit, l'effet du remous s'intensifie et s'étend plus en amont. La pente du lit devient plus douce, la section des profils en travers diminue, les inondations sont plus fréquentes et le niveau de la nappe phréatique s'élève, ce qui augmente les problèmes de drainage.

Pour analyser ces effets en amont, il est nécessaire de prévoir tout d'abord le développement du delta lié au remplissage de la retenue. Cette estimation est complexe en raison des variables : exploitation de la retenue, dimensions des sédiments et taux d'apports solides à la retenue, modification de la capacité hydraulique résultant du remblaiement du lit. Les sédiments qui se sont déposés lors d'un niveau élevé de la retenue sont souvent repris et transportés plus loin dans la retenue, lorsque son niveau est plus bas. En conséquence, les tentatives de réalisation de modèles mathématiques ou physiques de la formation du delta des retenues rencontrent des succès très variés.

Une méthode de prévision de la formation des deltas dans les retenues a été mise au point de façon empirique, en se basant sur les dépôts dans les deltas de retenues existantes, par le Bureau of Reclamation [20]. La Fig. 5-1 montre un profil de delta caractéristique. On y voit le delta, limité par la ligne de pente supérieure, le talus frontal et le lit initial du thalweg. Le point d'intersection entre les lignes de pente supérieure et frontale est appelé le point pivot. La cote du point pivot est considérée comme étant le niveau d'exploitation moyen de la retenue. Le volume des matériaux du delta est supposé être constitué de particules de dimensions égales ou supérieures au sable ($> 0,062$ mm) pénétrant dans la retenue au cours de la période d'analyse. Les couches du fond de la retenue sont constituées des particules plus fines qui ont été transportées plus profondément dans la retenue. Une méthode par approximations successives, utilisant les profils en travers des levés topographiques de la retenue, est employée pour calculer le volume des dépôts du delta à partir des surfaces moyennes des zones d'extrémité.

La pente de la couche supérieure peut être déterminée en calculant la pente de transport nul pour toute équation de débit de charriage en tenant compte des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau et des propriétés des matériaux du lit. La Fig. 5-2 compare la pente initiale du cours d'eau à la pente de la couche supérieure du delta pour plusieurs retenues des États-Unis. Sur la base de ces

5. SECONDARY EFFECTS

In addition to the primary physical effects of reservoir sediment deposition on the desired functions of the reservoir, there are several secondary impacts which may extend a significant distance beyond the confines of the reservoir or which may impact other interests which were not a part of the reservoirs primary functions. To the extent that these impacts add or detract from the services expected from the reservoir, they must be evaluated and accommodated in the planning, design, and construction of the reservoir.

5.1. DEFORMATION OF RIVER CHANNELS

The incoming stream channel can be expected to aggrade due to the backwater effect on the sediment transport capability of the stream. As the reservoir delta grows, the backwater effect becomes progressively greater and extends further upstream. Channel gradients become flatter, channel cross sections are reduced in area, flooding is more frequent, and ground-water tables are held at a higher level increasing drainage problems.

To analyze these upstream effects, it is necessary to first predict the delta development associated with the reservoir impoundment. This prediction is complex because of the variables of reservoir operation, size, and rate of sediment being transported into the reservoir, and the varying hydraulic capacity as aggradation occurs. Sediment deposited at high reservoir elevation is often picked up and carried further into the reservoir at lower reservoir stages. Consequently, attempts at mathematically or physically modeling reservoir delta formations have met with varying success.

One method of predicting reservoir delta formation has been developed as an empirical procedure based upon delta deposits in existing reservoirs by the Bureau of Reclamation [20]. A typical delta profile is shown in Fig. 5-1. It shows the delta as bounded by the topset slope, foreset slope, and the original thalweg slope. The point of intersection between the foreset and topset slopes is referred to as the pivot point. The elevation of the pivot point is established as the median operating level of the reservoir. The volume of material in the delta is assumed to be the sand size and coarser (> 0.062 mm) entering the reservoir for the period of analysis. The bottom set beds represent the finer sediment material that has been carried deeper into the reservoir. A trial and error procedure using cross sections developed from reservoir topography is employed to compute volumes of delta deposits from average end areas.

The topset slope may be established by computing the slope of zero transport for any of several bedload equations using the incoming stream hydraulic and bed material properties. Fig. 5-2 is a comparison of original streambed slope to delta topset slope for several USA reservoirs. A topset slope equal to one-half the original slope is often used based on these data. The foreset slope is empirically established

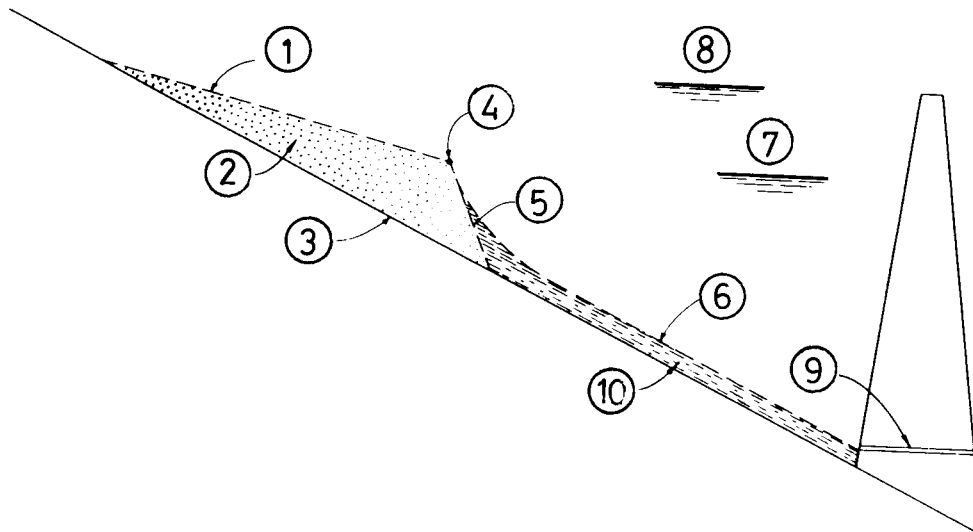


Fig. 5-1

Typical delta formation.

Formation typique d'un delta.

- | | |
|-----------------------------|--|
| (1) Topset slope. | (1) <i>Pente à l'extrémité amont.</i> |
| (2) Coarse sediments. | (2) <i>Dépôts grossiers.</i> |
| (3) Original thalweg slope. | (3) <i>Pente du thalweg à l'origine.</i> |
| (4) Pivot point. | (4) <i>Point pivot.</i> |
| (5) Foreset slope. | (5) <i>Talus frontal.</i> |
| (6) Bottomset slope. | (6) <i>Pente dans la partie aval.</i> |
| (7) NWS. | (7) <i>Niveau de retenue normal.</i> |
| (8) MWS. | (8) <i>Niveau de retenue maximal.</i> |
| (9) Outlets. | (9) <i>Vidanges.</i> |
| (10) Fine sediments. | (10) <i>Sédiments fins.</i> |

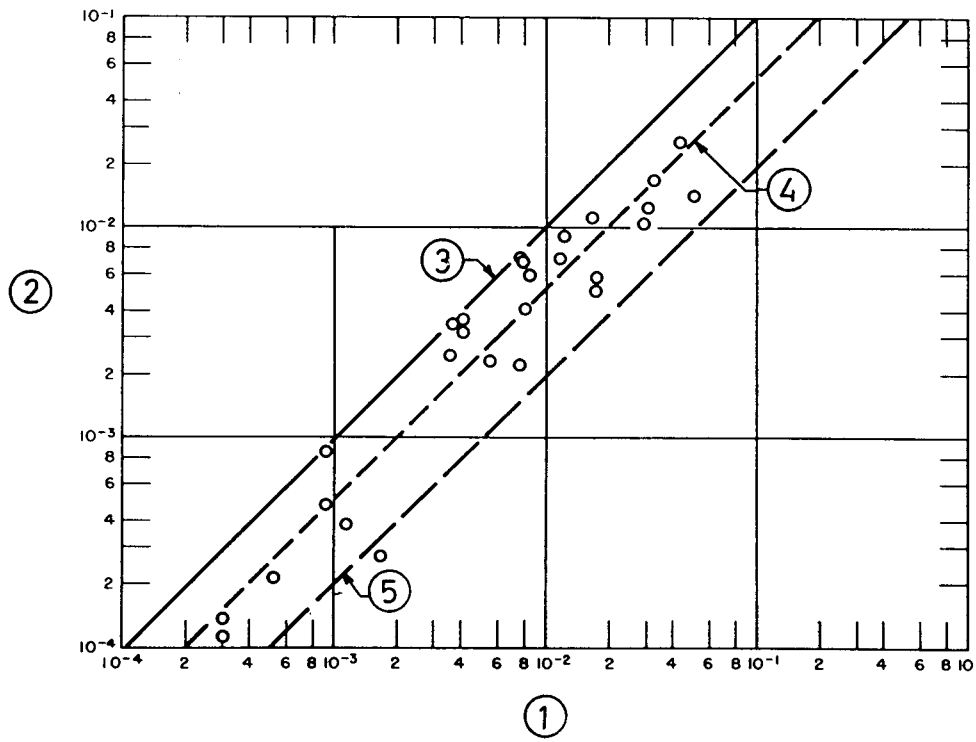


Fig. 5-2

Topset slope versus original stream slope.

Pente à l'extrémité amont en fonction de la pente initiale du cours d'eau.

- | | |
|--|--|
| (1) Original stream slope in meters/meters. | (1) Pente initiale du cours d'eau (en m/m). |
| (2) Topset Bed Slope in meters/meters. | (2) Pente à l'extrémité amont (en m/m). |
| (3) Curve 1 : Topset Bed Slope in Percent of original slope : 100. | (2) Courbe 1 : Pente de l'extrémité amont en % de la pente initiale : 100. |
| (4) Curve 2 : Topset Bed Slope in Percent of original slope : 50. | (4) Courbe 2 : Pente de l'extrémité amont en % de la pente initiale : 50. |
| (5) Curve 3 : Topset Bed Slope in Percent of original slope : 20. | (5) Courbe 3 : Pente de l'extrémité amont en % de la pente initiale : 20. |

données, on retient souvent une pente de la couche supérieure égale à la moitié de la pente initiale. Empiriquement, la pente du talus frontal est prise égale à 6,5 fois la pente de la couche supérieure. Quand celle-ci atteint le barrage, le talus frontal disparaît. Ceci se produit rapidement dans le cas des petites retenues.

Le point amont du delta dans la première approximation est fixé à l'intersection du plan d'eau maximal de la retenue et du lit initial du cours d'eau. La ligne de pente de la couche supérieure est projetée vers l'aval de ce point, sur le niveau moyen d'exploitation de la retenue, et le volume est calculé. S'il est nécessaire de modifier sensiblement les dimensions du delta, on peut avancer ou reculer le point pivot, au niveau moyen d'exploitation, et projeter la ligne de pente supérieure vers l'amont, depuis ce nouvel emplacement du point pivot. Une telle méthode peut conduire à des dépôts dans le delta dépassant le niveau maximal de la retenue, cependant, ceci n'a rien d'inhabituel, particulièrement pour les petites retenues.

Qian [43] suggère une méthode graphique identique, basée sur une formule empirique mise au point à partir de données recueillies sur des retenues chinoises. Il propose l'équation suivante pour prévoir la pente de la couche supérieure du delta.

$$J_1 = A_* \frac{S_*^{5/6} D_{50}^{5/3} d_{50}^{1/3}}{(Q/B)^{1/2}} \quad (9)$$

dans laquelle :

- J_1 : pente prévue de la couche supérieure du delta,
- A_* : coefficient variant de $1,21 \times 10^4$ à $1,68 \times 10^4$ pour différentes rivières de Chine,
- S_* : concentration moyenne des matériaux charriés pendant la saison des crues, en kg/m^3 ,
- D_{50} : diamètre moyen des matériaux en suspension, en mm,
- d_{50} : diamètre moyen des particules de fond, en mm,
- Q : débit moyen pendant la saison des crues, en m^3/s ,
- B : largeur de l'écoulement, en m.

Les observations de Qian suggèrent une pente du talus frontal égale à 6,5 fois la pente initiale du cours d'eau.

Une fois établi l'emplacement du delta, il faut calculer la courbe de remous pour analyser l'effet de l'alluvionnement de la retenue sur le niveau de crue en amont du réservoir. Le lit initial du cours d'eau et les profils en travers de la retenue doivent être modifiés suivant l'alluvionnement du delta et les courbes de remous calculés pour comparer avec ces mêmes éléments avant retenue des eaux. Tous les calculs du profil en long du plan d'eau doivent partir d'un point suffisamment en aval dans la retenue pour que les vitesses soient négligeables.

Un des résultats de l'alluvionnement des deltas des retenues, important pour le calcul de la courbe de remous, est l'extraordinaire croissance de la végétation à laquelle on peut s'attendre. Le dépôt d'alluvions fertiles et le niveau élevé de la nappe phréatique créent des conditions de croissance idéales, particulièrement pour les phréatophytes. Cette végétation très dense gênera le passage des crues et il faut en tenir compte pour les coefficients de rugosité dans les calculs de la courbe de remous.

La croissance de phréatophytes dans la zone du delta va accélérer l'évapotrans-

at 6.5 times that of the topset slope. Once the topset slope reaches the dam, the foreset slope disappears. This happens at an early stage in the case of small reservoirs.

The upstream point of the delta for the first trial is set by the intersection of the maximum water surface and the original streambed. The topset slope is projected forward from that point to the median elevation of reservoir operations and the volume computed. If a significant change in delta size is needed, the pivot point can be moved forward or backward at the median operations elevation and the topset slope projected back from this new pivot point location. Delta deposits above the maximum water surface may result from this procedure; however, this is not an uncommon observation particularly in small reservoirs.

Qian [43] suggests a similar graphical procedure based upon empirical relationships developed from reservoir data in China. He suggests the following equation for predicting the delta topset slope :

$$J_1 = A_* \frac{S_*^{5/6} D_{50}^{5/3} d_{50}^{1/3}}{(Q/B)^{1/2}} \quad (9)$$

in which :

J_1 : the predicted delta topset slope,

A_* : A coefficient which varies from 1.21×10^4 to 1.68×10^4 for various Chinese rivers,

S_* : mean concentration of bed material load in the flood season in kg/m^3 ,

D_{50} : median diameter of the bed material in suspension in m,

d_{50} : median diameter of bed material in m,

Q : mean discharge in the flood season in m^3/s ,

B : width of flow in m.

His observations suggest a foreset slope equal to 1.6 times the original stream slope.

When the delta location has been established, backwater computations are required to analyze the effect of reservoir deposition on the flood elevation upstream from the reservoir. The original stream channel and reservoir cross sections should be modified for the delta deposits and backwater profiles computed to compare with those for preimpoundment conditions. All water surface profile computations should be started far enough downstream in the reservoir so that velocities are negligible.

One result of reservoir delta deposits important to the backwater analysis is the tremendous vegetative growth that can be anticipated. The fertile sediment deposits and high water tables are ideal growing conditions, particularly for phreatophytes. This anticipated dense growth will have an obstructing effect on flood flows and should be accommodated in the roughness assignments in the backwater computations.

The phreatophyte growth in the delta areas will increase the evapotranspiration

piration de l'eau alimentant la retenue, cependant, cet effet peut être compensé si les lieux ont une certaine valeur pour le développement de la flore, de la faune et des loisirs.

La Fig. 5-3 est une photographie du delta de la rivière Bill Williams à son entrée dans le lac Havasu, en Arizona, États-Unis. La couleur claire représente la pénétration du delta dans la retenue et on constate l'abondance des phréatophytes.

5.2. MODIFICATIONS DE LA QUALITÉ DE L'EAU

L'effet des sédiments sur la qualité de l'eau des retenues et des cours d'eau en aval des barrages n'est pas encore bien compris et est largement controversé. L'eutrophisation est un terme appliqué aux eaux des retenues pour décrire le phénomène de prolifération de la végétation caractérisé par l'augmentation du niveau des matières nutritives, le déficit en oxygène dissous et l'accroissement de l'activité biologique. Les lacs et les retenues sont classés suivant leur concentration en éléments nutritifs et leur activité biologique [54]. Le processus de vieillissement va faire passer une retenue d'un état de faible niveau nutritif (oligotrophique) à un état intermédiaire (mésotrophique), puis à un état de haut niveau nutritif et de grande activité biologique (eutrophique). C'est au cours de ce processus de vieillissement que les sédiments entrants affectent le plus la qualité de l'eau. L'entrée et

from the reservoir water supply; however, this may be offset if the habitat has value for wildlife and recreation development.

Fig. 5-3 is a photograph of the delta of the Bill Williams River as it enters lake Havasu in Arizona, USA. The light color represents the delta intrusion into the reservoir and the phreatophytic growth is quite prominent.

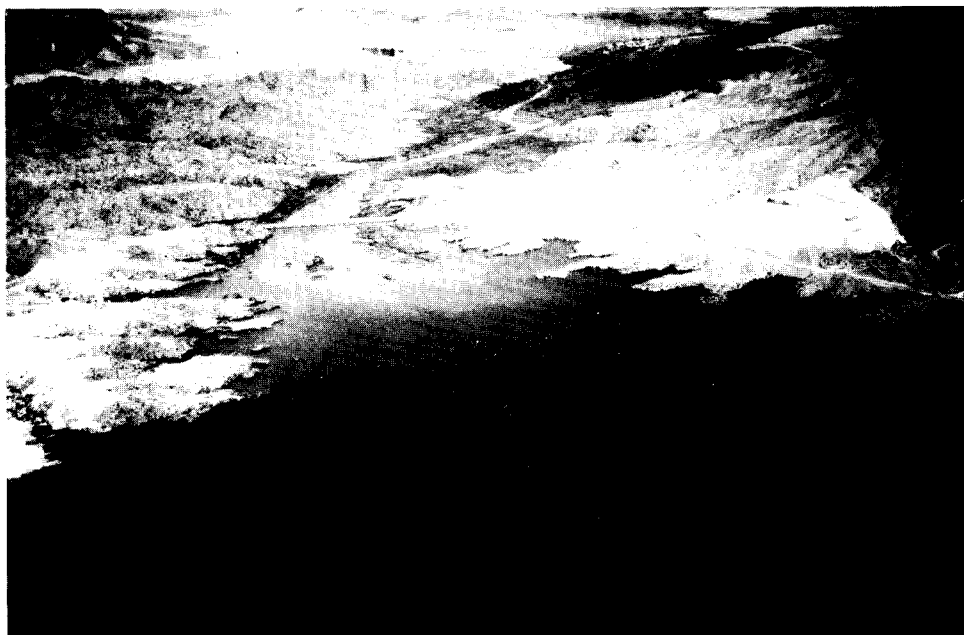


Fig. 5-3

Delta of the Bill Williams Arm of Lake Havasu.

Delta de la rivière Bill Williams à son entrée dans le lac Havasu.

5.2. CHANGES IN WATER QUALITY

The impact of sediment on reservoir and downstream water quality is not as yet well understood and is largely speculative. Eutrophication is a term applied to impounded waters to describe the maturing process characterized by increased nutrient levels, dissolved oxygen deficits, and increased biological productivity. Lakes and reservoirs are classified based upon the relative magnitude of the concentrations of nutrients and biological productivity [54]. The aging process will move a reservoir from a state of low nutrient level (oligotrophic), through an intermediate phase (mesotrophic) to high level of nutrient and biological activity (eutrophic). It is in this aging process that incoming sediments play their largest part in affecting water quality. The influx and deposition of sediment may have both positive and negative impacts on the eutrophication process.

le dépôt des sédiments peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur le processus d'eutrophisation. En présence de substances nutritives appropriées, de carbone et de lumière solaire, des algues apparaissent. Quand elles commencent à proliférer, la qualité de l'eau peut se dégrader du fait de l'augmentation du coût du traitement pour se débarrasser des microparticules et des odeurs, la teneur en oxygène diminue pendant le processus de dépérissement, les conditions d'anaérobie conduisent à la formation d'hydrogène sulfuré, de méthane, d'ammoniaque, et solubilisent les métaux lourds.

En théorie, le phosphore et l'azote sont tous deux des substances nutritives limitant le cycle de croissance de la végétation de la retenue, et pourtant, les études limnologiques montrent que c'est le phosphore qui a la plupart du temps cet effet. Le phosphore est transporté en solution dans les retenues et se fixe aux particules solides. Le phosphore ainsi fixé se libère suivant le déplacement et le dépôt des sédiments dans les retenues. Bien qu'il y ait une certaine contradiction entre les thèses en présence, quant au destin ultime du phosphore fixé aux sédiments déposés, on peut conclure en général que le phosphore fixé aux sédiments des dépôts recouverts est indisponible mais que celui fixé aux sédiments se trouvant à l'interface eau-sédiments peut se libérer et contribuer au processus d'eutrophisation [54, 55, 56, 57]. Comme le phosphore se fixe aux particules les plus fines, il faut s'attendre à ce que son dégagement maximal ait lieu dans la retenue et que la situation d'interface soit pratiquement générale. L'abaissement du niveau de la retenue chasse et expose des sédiments auparavant recouverts, ce qui entraîne des possibilités supplémentaires de dissolution.

Il a été noté par Thornton, *et al.* [58] que la turbidité et la formation d'algues étaient inversement proportionnelles. Il apparaît par conséquent que le blocage du passage de la lumière par les sédiments en suspension a un effet sur le phénomène de photosynthèse. L'accroissement de la turbidité peut avoir également un impact sur le processus biologique du fait d'une modification de la température. Il a été observé que la turbidité des couches supérieures d'une retenue s'opposait beaucoup à l'élévation de température de ses couches inférieures.

Hermann et Mahan [59] ont trouvé que le dépôt de métaux lourds (Fe, Mn, Zn, Mg, Cu, Cd, Pb) dans la zone du delta de la retenue de Pueblo, au Colorado, États-Unis, avait une interaction avec l'eau et les sédiments. Bien que des ions métal soient parfois libérés dans l'eau, c'est la réaction avec les sédiments déposés qui produit l'effet le plus net et le plus considérable. Par conséquent, le delta d'une retenue peut retenir une grande quantité de métaux sous forme de traces, soit en suspension, soit en solution, qui sans cela auraient été portés plus loin par les eaux.

Les sédiments peuvent servir également de véhicule de transport aux pesticides. Bien que moins de travaux aient été consacrés aux interactions entre sédiments et pesticides qu'à celles entre substances nutritives et métaux, il semble probable que le dépôt des sédiments dans les retenues a un effet similaire de fixation des pesticides transportés par les sédiments entrants.

L'alluvionnement a peu d'influence sur la salinité de l'eau des retenues. On s'est demandé si la permanence de la précipitation de carbonate de calcium, rapportée par Reynolds [60] pouvait être accrue par les dépôts successifs de sédiments. Aucune étude concluante n'a encore été entreprise.

When adequate nutrients, carbon, and sunlight are available, algae blooms will occur. When these blooms become large enough, the water quality may be diminished because of increased treatments costs for particulate and odor removal, oxygen levels are reduced in the decaying process, the anerobic conditions lead to formation of hydrogen sulfide, methane, ammonia, and the solubilization of heavy metals.

Phosphorus and nitrogen are theoretically both limiting nutrients in the reservoir plant growth cycle, however, phosphorus is most commonly found to be limiting in limnological studies. Phosphorus is transported into reservoirs in solution and attached to sediment particles. The sediment-attached phosphorus will be disbursed according to the movement and deposition of the sediment within the reservoir. Although there are some contradictions within the available literature as to the ultimate fate of the phosphorous attached to the deposited sediments, in general it can be concluded that the phosphorous attached to covered deposits is unavailable but the sediment-attached phosphorous at the sediment-water interface is available for release and may contribute to the eutrophication process [54, 55, 56, 57]. Because the phosphorous is attached to the finer sediment particles, it is to be expected that maximum disbursement will occur within the reservoir and the interface will be quite general. Reservoir drawdowns will scour and expose previously covered sediments resulting in additional opportunities for solubilization.

It has been noted by Thornton *et al.* [58] that the turbidity and algae production in reservoirs are inversely proportional. Therefore, it appears that the light blocking effect of suspended sediment has an impact on the photosynthetic process. The impact of increased turbidity may also act upon the biologic process through change in temperature. It has been observed that turbid upper level waters will significantly inhibit temperature rise at lower depths of the reservoir.

Herrmann et Mahan [59] ont trouvé que le dépôt de métaux lourds (Fe, Mn, Zn, Mg, Cu, Cd, and Pb) occurring in the delta area of Pueblo Reservoir in Colorado, USA, are interacting with the water and sediment. Although the metal ions are at times released to the water, the much larger and net effect is the reaction with the deposited sediment. Consequently, the delta of a reservoir can become an important trap for both suspended and dissolved trace metals which would otherwise be carried by the water.

Sediment may act as a transport vehicle for pesticides as well. Although less work has been done on the interrelationship of sediment and pesticides than that of nutrients and metals it seems probable that reservoir sediment deposition would have similar fixing action on pesticides being carried by the incoming sediment.

Sedimentation has little effect on the salinity of the reservoir water. There has been some conjecture that the permanence of calcium carbonate precipitation as reported by Reynolds [60] may be enhanced by subsequent layering of sediment deposits. No definitive studies have as yet been undertaken.

5.3. EFFETS ÉCOLOGIQUES

Les effets écologiques de l'alluvionnement des retenues ont généralement un aspect secondaire. Il est difficile de séparer ou de percevoir l'effet de l'alluvionnement dans l'impact considérable de la création d'une retenue. Certains effets écologiques importants sont liés cependant au processus d'alluvionnement; aussi convient-il de les considérer au stade de l'étude et de la construction des retenues.

L'effet de l'alluvionnement sur la qualité de l'eau des retenues a été traité au paragraphe 5-2. Si on analyse l'effet de la qualité de l'eau d'une retenue sur le peuplement en poissons, on peut trouver une relation de cause à effet avec l'alluvionnement. Lowe-McConnell [61] résume les manifestations biologiques qui suivent la création d'une retenue. L'élévation initiale du niveau d'eau entraîne la submersion et finalement la décomposition de la végétation terrestre environnante. Les substances nutritives en résultant entraînent une explosion de l'activité bactérienne, de la flore et de la faune. Les poissons se multiplient rapidement puis se raréfient à mesure que les substances nutritives s'épuisent. La période de « dépression » qui s'ensuit peut durer plusieurs années et être suivie par une augmentation du nombre des poissons quand le lac trouve son équilibre. L'effet des sédiments sur le processus de photosynthèse est donc lié à la production de poissons de la retenue.

Certaines espèces de poissons ont des frayères en bordure de l'eau. Si des sédiments s'y déposent, la reproduction et la survie de ces espèces peuvent être menacées.

Les dépôts de sédiments peuvent constituer l'habitat de certains organismes animaux ou végétaux indispensables à la chaîne alimentaire de certaines espèces de poissons de la retenue.

On a beaucoup cru, dans le passé, aux effets des crues sur l'aménagement et la fertilisation des terres, particulièrement dans le delta terminal des grands fleuves. Bien entendu, c'est le débit solide charrié par les eaux des rivières en crue qui a été à la base de la formation initiale de ces terres, cependant, l'effet de fertilisation des inondations ultérieures est probablement largement surévalué et, quand on considère les pertes d'eau en période de crue, l'effet net est négatif [62, 63, 64]. Les sédiments déposés dans les retenues amont ne seront plus disponibles pour ces processus de constitution des deltas. Un fait particulier cause de l'inquiétude dans quelques zones côtières : c'est la disparition des sédiments de la dimension du sable, naturellement charriés par les eaux, qui sont nécessaires au maintien des plages. Lorsque les rivières n'alimentent pas ces plages en sédiments, on est obligé de transporter de grandes quantités de sable pour assurer leur entretien. Des mesures de protection supplémentaires des plages sont également indiquées dans le rapport ASCE.

D'autre part, les embouchures des cours d'eau barrés par des barrages ont tendance à être plus fréquemment obturées par des cordons de sable. Ce phénomène se produit quand les débits en aval des barrages sont trop faibles pour se frayer un chemin à travers les cordons littoraux érigés par l'action des vagues du côté du large. Une telle obstruction peut avoir de sérieuses conséquences écologiques, particulièrement là où les poissons de mer disposent leurs œufs dans les estuaires.

Nous avons évoqué plus haut que des organismes végétaux et animaux étaient amenés à se développer considérablement dans la zone du delta des retenues. Les

5.3. ECOLOGICAL EFFECTS

The ecological effects of reservoir sedimentation are generally of a secondary nature. It is difficult to separate or find the impact of the sedimentation in the overwhelming impact of the creation of a reservoir. There are some significant ecologic impacts, however, which are sediment related and should be considered in the planning and construction of reservoir projects.

In section 5.2 the effect of sedimentation on reservoir water quality is discussed. If the effect of water quality on reservoir fishery production is analyzed, a cause and effect relationship with sedimentation can be traced. Lowe-McConnell [61] summarizes the biological events after a reservoir is formed. The initial rising water level results in the drowning and eventual decay of the surrounding terrestrial vegetation. The resulting nutrients create an outburst of production of bacteria, flora, and fauna. Fish populations expand rapidly and then decline as the nutrients are exhausted. The subsequent "depression" may last for several years followed by a production increase as the lake equilibrates. The impact that sediment has on the photosynthetic process is thus linked to the fish production of the reservoir.

Some of the fish species may be dependent upon the shoreline for spawning areas. Sediment deposits in these areas could adversely effect the propagation and survival of those particular species.

Deposited sediments may provide the habitat for some plant and animal organisms that are critical to the food chain of some elements of the reservoir fish population.

Much credit has been given in the past to the soil building and fertilization effects of river flooding, particularly in the terminal deltas of large rivers. Obviously, the original formation of these lands was dependent upon the sediment load of the river floodwaters; however, the fertilization effect of subsequent inundations is probably overrated and when the losses of the floodwaters are considered, the net effect is negative [62, 63, 64]. Sediment deposited in upstream reservoirs will no longer be available for these delta building processes. A particular circumstance causing concern in some coastal areas is the elimination of naturally transported sand size sediments required for the maintenance of beaches. Without the beach nourishment sediment discharge from some rivers, large quantities of sand are being hauled for the maintenance of the beaches. Additional beach protection measures are also reported in ASCE [9].

On the other hand, mouths of dammed rivers tend to be closed more often by sand spits. This happens where discharges downstream of dams are too small to break through spits built up by wave action on the seaward side. Such blocking may have serious ecological consequences, especially where ocean fish spawn within estuaries.

Earlier reference has been made to the increased wildlife habitat that can be expected to develop in the delta areas of reservoirs. The freshly deposited sediments

sédiments fraîchement déposés constituent un habitat idéal, particulièrement pour les phréatophytes. Ces zones sont souvent réservées à la protection de la flore et de la faune, et aux loisirs.

Dans certains cas, les sédiments emportés par le vent ont posé des problèmes à l'extérieur des bassins des retenues. Si les sédiments déposés ou les sédiments du bassin contiennent suffisamment de fines particules et que les conditions locales de vent sont critiques, un grave problème d'érosion par le vent et de poussière peut se poser. Le risque augmente quand le développement de la protection végétale est contrecarré par le batillage, des baisses importantes ou limitées de la retenue, etc. Un système de digues basses a été utilisé pour maintenir des plans d'eau peu profonds sur les zones menacées d'érosion. Accessoirement, ces plans d'eau servent d'habitat aux oiseaux aquatiques.

On peut s'attendre à ce que les effets écologiques en aval d'une retenue se manifestent également par la présence de matériaux plus grossiers dans le lit de la rivière et, dans certains cas, par un élargissement de ce lit, lié à une érosion de ses berges. De nombreux cours d'eau se sont trouvés peuplés de poissons d'eau froide à la suite de lâchures d'eau stockée dans les retenues à une grande profondeur et ne contenant pas de sédiments. La disparition par érosion de la végétation des berges peut être préjudiciable à la vie sauvage.

5.4. MODIFICATIONS DU LIT A L'AVAL DU BARRAGE

La rétention de sédiments dans une retenue, accompagnée d'évacuation d'eau claire par le barrage, bouleverse le régime du cours d'eau en aval. Un cours d'eau naturel transportant des sédiments est généralement en équilibre, sans aucune tendance, à long terme, au remblaiement ou au creusement du lit.

5.4.1. Creusement du lit

L'évacuation d'eau claire, ayant une capacité à se charger avec des sédiments, va bouleverser la stabilité naturelle du cours d'eau en aval du barrage par creusement de son lit et de ses berges. Le processus de creusement se déplace progressivement vers l'aval jusqu'à atteindre un point où les sédiments transportés entraînent une stabilisation du lit ou un équilibre. La chasse de matériaux grossiers à travers le barrage a un effet compensateur sur le creusement du lit.

Ce creusement peut avoir plusieurs conséquences indésirables sur l'environnement à l'aval. Les ouvrages enjambant le lit ou passant dessous, par exemple les ponts ou les canalisations, sont exposés à un abaissement du lit pouvant mettre en danger leur stabilité. Si les berges du cours d'eau sont la zone attaquée, des propriétés agricoles, industrielles ou résidentielles de valeur peuvent être en péril à moins que des mesures de protection ne soient prises. Certains aspects positifs du processus de creusement du lit ont aussi été observés, tels que l'abaissement du niveau de l'eau dans le canal de fuite des centrales hydroélectriques et le drainage des terres, à nappe phréatique élevée, situées dans le lit majeur. Les espèces biologiques du cours d'eau aval seront affectées plus spécialement par la présence de matériaux plus grossiers au fond du lit et par la modification de la croissance végétale le long des berges. L'érosion des lits des affluents peut être augmentée par l'abaissement de la section de contrôle du lit au confluent avec le cours d'eau principal.

are an ideal habitat, particularly for phreatophytes. These areas are often reserved as wildlife refuges and recreational areas.

In some instances windblown sediments have caused problems outside reservoir basins. If the deposited or basin sediment contains sufficient fine particles and local wind conditions are critical, a severe wind erosion and dust problem can develop. The risk is increased where development of vegetal protection is inhibited through wave action, severe or limited drawdown, etc. A system of low dikes has been used to retain shallow water ponds over the erosion susceptible areas. These shallow ponds serve a secondary purpose of providing waterfowl habitat.

The ecological impacts downstream from a reservoir can be anticipated to include a coarsening of the streambed material and in some cases a potential widening of the stream channel with associated streambank erosion. Many streams have been converted to cold water fisheries due to the releases of impounded water from greater reservoir depths which are sediment free. The loss of streambank vegetation to erosion may be detrimental to wildlife.

5.4. DOWNSTREAM CHANNEL CHANGES

The trapping of sediment in a reservoir accompanied by clear water releases from the dam upsets the regime of the downstream river channel. A natural flowing stream transporting sediment is usually in equilibrium with no long-term trend towards aggradation or degradation.

5.4.1. Degradation

The release of clear water, which has a capacity to pick up a sediment load, will upset the natural stable condition through degradation of the downstream bed and banks. The degradation process moves progressively downstream until it reaches a point where the sediment being transported results in a stable channel or equilibrium. Any coarse sediments being sluiced through the dam will have an offsetting effect on the channel degradation.

This degradation may have several undesirable consequences on the downstream environment. In-channel structures such as bridges or under channel pipe crossings will be subject to a streambed lowering that could endanger their structural integrity. If the channel banks are the point of attack, valuable agricultural, industrial, or residential properties could be endangered unless protective measures are taken. Some positive aspects of the degradation process have also been observed such as the lowering of tailwater elevations at hydroelectric facilities and the drainage of flood plain lands having high water tables. The biologic community in the downstream channel will be effected most notably by a coarsening of the channel bottom material and a change of the vegetative growth along the channel banks. Erosion of tributary channels may be increased due to the drop of channel control at the tributary stream mouth.

Plusieurs modèles informatiques, tentant de simuler l'hydraulique du lit de la rivière et de formuler les équations de transport solide, de façon à prévoir le processus de creusement, existent ou sont en cours de mise au point. Ces modèles n'étant pas encore au point, le Bureau of Reclamation [20] continue d'utiliser, comme outil de prévision, l'analyse du pavage ou de la pente stable. Ces méthodes sont résumées ci-après.

Quand le lit est constitué de matériaux transportables et que l'épaisseur de ces matériaux dépasse la profondeur prévisible de creusement du lit, la méthode la plus utile consiste à calculer la pente stable ou pente limite du lit, en estimant le volume de creusement prévu, puis en déterminant le profil à trois pentes du lit qui correspond à ces valeurs. Cependant, s'il existe une quantité suffisante de matériaux grossiers ou de grandes dimensions qui ne peuvent être transportés par les débits normaux de la rivière, un pavage va se former au fur et à mesure que les plus fines particules se détachent et sont transportées en aval. Le creusement vertical se poursuit à une vitesse de plus en plus lente jusqu'à ce que l'épaisseur du pavage soit suffisante pour empêcher tout creusement ultérieur.

Méthode du pavage. La méthode du pavage est un procédé moins détaillé, qui doit tout d'abord être testé pour calculer le creusement à l'aval d'un barrage. Elle s'applique particulièrement lorsque des matériaux grossiers ou de grandes dimensions ne peuvent être transportés par le débit normal de la rivière et se trouvent en quantité suffisante pour constituer une couche de protection (pavage), comme décrit par Pemberton [66] pour le lit du Colorado, à l'aval du barrage Glen Canyon.

Suivant la méthode du pavage, les plus fines particules transportables se séparent des autres et le creusement vertical se poursuit, à une vitesse de plus en plus lente, jusqu'à ce que le pavage ait une épaisseur suffisante pour empêcher tout creusement ultérieur. On peut compter sur la formation de cette couche de protection quand au moins 10 % environ des matériaux du lit ont une dimension égale ou supérieure aux éléments nécessaires à la constitution du pavage. Les calculs supposent que le pavage, ainsi que le représente la Fig. 5-4, se formera comme suit :

$$y_a = y - y_d \quad (11)$$

équation dans laquelle :

y_a : épaisseur du pavage (couche de protection),

y : hauteur entre le lit initial et le fond du pavage,

y_d : hauteur entre le lit initial et le dessus du pavage ou profondeur de creusement et, par définition :

$$y_d = (\Delta p) y \quad (12)$$

où :

Δp : pourcentage décimal de matériaux de dimension supérieure à celle des matériaux du pavage.

Les deux équations se combinent en :

$$y_d = y_a \left(\frac{1}{\Delta p} - 1 \right) \quad (13)$$

There are in existence or development, several computer models which attempt to simulate river channel hydraulics and sediment transport equations such that the degradation process can be predicted. Until these models are perfected, the Bureau of Reclamation [20] continues to use either an armoring or stable slope analysis as a predictive tool. The following discussion summarizes these approaches.

In cases where the streambed is composed of transportable material and the material extends to depths greater than that to which the channel can be expected to degrade, the approach most useful is that of computing the stable channel slope or limiting slope, estimating the volume of expected degradation, and then determining a three-slope channel profile which fits these values. However, if large size or coarse material which cannot be transported by normal river discharges exists in sufficient quantities, an armor layer will develop as the finer material is sorted out and transported downstream. Vertical degradation will proceed at a progressively slower rate until the armor is of sufficient depth to inhibit further degradation.

Armoring method. A less detailed procedure, which should be tested first for computing degradation below a dam, is the armoring control method. This is especially applicable if large size or coarse material exists in the channel bottom that cannot be transported by normal river discharge and is in sufficient quantity to provide an armor layer as described by Pemberton [66] below Glen Canyon Dam on the Colorado River.

Under the armoring process, the finer transportable material is sorted out, and vertical degradation proceeds at a progressively slower rate until armor is of sufficient depth to control further degradation. An armoring layer can usually be anticipated if there is approximately 10 percent or more of the bed material of armoring size or larger. The armoring computations assume that an armoring layer will form as shown in Fig. 5-4 as follows :

$$y_a = y - y_d \quad (11)$$

where :

y_a : thickness of armoring layer,

y : depth from original streambed to bottom of the armoring layer,

y_d : depth from the original streambed to top of armoring layer or the depth of degradation and by definition.

$$y_a = (\Delta p) y \quad (12)$$

where :

Δp : decimal percentage of material larger than the armoring size.

The two equations are combined to :

$$y_d = y_a \left(\frac{1}{\Delta p} - 1 \right) \quad (13)$$

L'épaisseur du pavage, y_a , variera suivant la dimension des particules nécessaires, mais on constate généralement une variation égale à trois fois le diamètre des particules du pavage ou à 0,15 m si cette dimension est moindre.

La dimension des particules solides nécessaires à la formation du pavage peut être calculée suivant différentes méthodes, chacune de celles-ci permettant de vérifier les autres. Chaque méthode indiquera une dimension de particules différent, aussi faut-il de l'expérience et du discernement pour choisir la plus appropriée. Les principales données de base nécessaires à ce calcul sont les suivantes : 1) échantillons de matériaux du lit mineur prélevés sur tout le cours concerné et à l'intérieur de la zone d'affouillement prévue; 2) choix d'un débit dominant, en général approximativement le débit de pointe biennal; 3) caractéristiques hydrauliques moyennes du lit correspondant au débit dominant retenu, obtenues par calcul de la courbe de remous de l'écoulement permanent tout au long du tronçon concerné de la rivière. Les méthodes utilisées pour calculer les dimensions des particules non

The depth, y_a , to armor will vary with size of particle needed but is usually found to vary by three armoring particle diameters or 0.5 foot (0.15 meter), whichever is smaller.

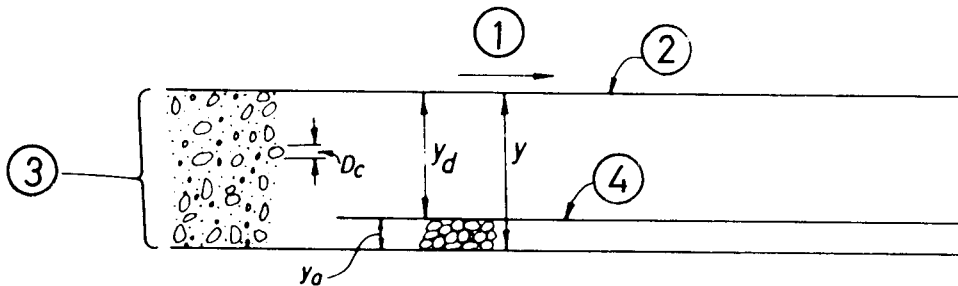


Fig. 5-4

Armoring definition sketch.

Définition schématique d'un pavage.

- | | |
|----------------------------|--------------------------------|
| (1) Flow. | (1) Écoulement. |
| (2) Original streambed. | (2) Lit initial de la rivière. |
| (3) Original bed material. | (3) Matériau du lit initial. |
| (4) Degraded streambed. | (4) Lit dégradé. |

- | | |
|--|--|
| y : Depth to bottom of the armoring layer | y : Profondeur jusqu'au niveau inférieur du pavage. |
| y_d : Depth of degradation. | y_d : Profondeur de dégradation. |
| y_a : Armoring layer. | y_a : Couche de pavage. |
| D_c : Diameter of armor material. | D_c : Diamètre du matériau de pavage. |
| Δ_p : Decimal percentage of original bed material larger than D_c . | Δ_p : Pourcentage du matériau du lit initial plus grand que D_c . |

The sediment particle sizes required for armoring can be computed by several methods with each regarded as a check on the other. Each method will indicate a different armoring size which requires experience and judgment in selecting the most appropriate. The basic data required to make these computations necessitate : 1) samples of the streambed material through the reach involved and at a depth through the anticipated scour zone, 2) selection of a dominant discharge usually approximately a 2-year frequency peak discharge, and 3) average channel hydraulic properties for the selected dominant discharge obtained from steady flow backwater

transportables permettant la constitution du pavage sont généralement basées sur une équation de transport solide ou une relation, comme l'indiquent les rapports de Lara et Pemberton [65], de l'ASCE [9] ou de Pemberton [13], de telles méthodes sont mentionnées ci-après :

Méthodes

1. Meyer-Peter, Muller.
2. Vitesse de fond appropriée.
3. Effort de traction.
4. Diagramme de Shield.
5. Vitesse-Xi.
6. Yang.

Un exemple de calcul de creusement du lit limité par un pavage, utilisant les méthodes qui précèdent, peut être trouvé dans l'ouvrage cité de Lara et Pemberton [65].

Méthode de la pente stable

La méthode de calcul d'une pente stable pour déterminer le creusement à l'aval d'un barrage est utilisée quand il n'y a pas suffisamment de matériaux grossiers pour constituer un pavage. On a recours à cette méthode quand le principal objectif est de calculer la profondeur d'affouillement immédiatement à l'aval du barrage pour l'étude du barrage et de la protection en aval contre l'affouillement vertical du lit. Elle sert aussi dans les premiers stades de conception du barrage, quand on dispose d'un nombre limité de données sur le site et que le coût d'une étude plus détaillée est prohibitif. On fait appel aux solutions plus détaillées qu'offre l'informatique quand on dispose de données pour vérifier le modèle mathématique, quand l'hydraulique du lit est idéale, et que le creusement influence la morphologie du lit sur plusieurs kilomètres en aval du barrage.

La méthode de la pente stable est illustrée par le schéma de la Fig. 5-5. La pente stable est définie comme étant la pente du cours d'eau ne permettant plus le transport des matériaux du lit. Comme le montre la Fig. 5-5, la méthode est également appelée la méthode des trois pentes du fait de la variation de pente attendue entre la pente stable et la pente existant plus en aval. Le calcul de la pente stable peut être effectué en appliquant plusieurs méthodes telles que : 1) l'équation du débit de charriage de Schoklitsch dans les cas de transport de fond nul; 2) l'équation du débit de charriage de Meyer-Peter, Muller pour le début du transport; 3) le diagramme de Shield quand il n'y a pas de déplacement; 4) la relation de Lane pour la force de traction critique en supposant que de l'eau claire s'écoule dans les canaux [65]. Le débit à considérer avec les méthodes qui précèdent est le débit dominant qui est généralement défini comme étant l'écoulement maximal contenu par les berges du cours d'eau ou le débit de pointe de la crue biennale. Avec la régularisation du débit du cours d'eau par un barrage en amont, le problème devient plus complexe parce qu'on ne dispose pas généralement d'informations détaillées sur les futures lâchures. Si les lâchures d'une retenue sont à peu près uniformes et les débits de crue relativement rares, on peut retenir comme débit dominant le débit moyen journalier. Cependant, si les débits évacués sont soumis à des fluctuations considérables en raison des crues, le débit de pointe, égalé ou dépassé en moyenne une fois tous les deux ans, doit être retenu comme débit dominant.

computations through the selected reach of river. The methods used to compute a nontransportable size are usually based on some form of a sediment transport equation or relationship that will form the armor layer as described in reports of Lara and Pemberton [65], ASCE [9], or Pemberton [13] such as those of :

Methods

1. Meyer-Peter, Muller.
2. Competent bottom velocity.
3. Tractive force.
4. Shield's diagram.
5. Velocity-Xi.
6. Yang.

An example of a degradation computation limited by armor using above methods may be found in the reference by Lara and Pemberton [65].

Stable Slope Method

The method of computing a stable slope to define degradation below a dam is used when there is not enough coarse material to develop an armor layer. The method is used when the primary purpose is to compute a depth of scour immediately below the dam for design of the dam and downstream protection against vertical scour of the streambed. It is also used in early planning stages with a limited amount of field data and when costs for the more detailed study are prohibitive. The more detailed electronic computer solutions are used when data are available to verify the mathematic model, channel hydraulics are ideal, and degradation results influence the channel morphology for several kilometers below the dam.

The stable slope method is illustrated by the sketch in Fig. 5-5. The stable slope is defined as the slope of the stream at which the bed material will no longer be transported. As shown by Fig. 5-5, the method is also identified as the three-slope method because of the variation expected in slope between the stable slope and the existing slope further downstream. The computations of stable slope can be made by application of several methods such as : (1) Schoklitsch bedload equation for conditions of zero bedload transport, (2) Meyer-Peter, Muller bedloads equation for beginning transport, (3) Shield's diagram for no motion, and (4) Lane's relationship for critical tractive force assuming clear water flow in canals [65]. The discharge to be used in any of the above methods is the dominant discharge and is usually determined by the channel bankfull flow or 2-year flood peak discharge. With regulation of the streamflow by an upstream dam, the problem becomes more complex because detailed data on future releases are usually not available. If the releases from the reservoir are fairly uniform, and flood discharges are a relatively rare occurrence, the average daily discharge may be used as the dominant discharge. However, if the releases are subject to considerable fluctuation due to floods, the peak discharge which is equaled or exceeded on the average of once every 2 years would be considered the dominant discharge.

L'étape suivante du calcul du creusement du lit, selon la méthode de la pente stable, est la détermination des caractéristiques hydrauliques moyennes du lit pour le débit dominant. Ces données peuvent généralement être obtenues en se reportant à l'étude du niveau d'eau aval effectuée pour le barrage. On fait la moyenne des caractéristiques de tous les profils en travers de l'écoulement aval, dans les conditions de débit dominant, pour arriver à un profil en travers généralisé représentatif du creusement. On peut admettre que la pente de la ligne d'eau est égale au gradient hydraulique.

Le volume de matériaux enlevé, suivant la méthode de la pente stable, peut être déterminé de plusieurs façons. D'après la Fig. 5-5, il peut s'exprimer par :

$$V = A_T B \quad (14)$$

où :

V : volume de matériaux creusé, en m³,

A_T : surface longitudinale de creusement, en m²,

B : largeur de creusement du lit, en mètres.

Si rien n'est prévu pour limiter en aval la longueur (L) de creusement, les deux façons de calculer le volume sont : 1) supposer que la rivière va ramasser une charge en matériaux grossiers (> 0,062 mm) égale à la charge en particules, de diamètre

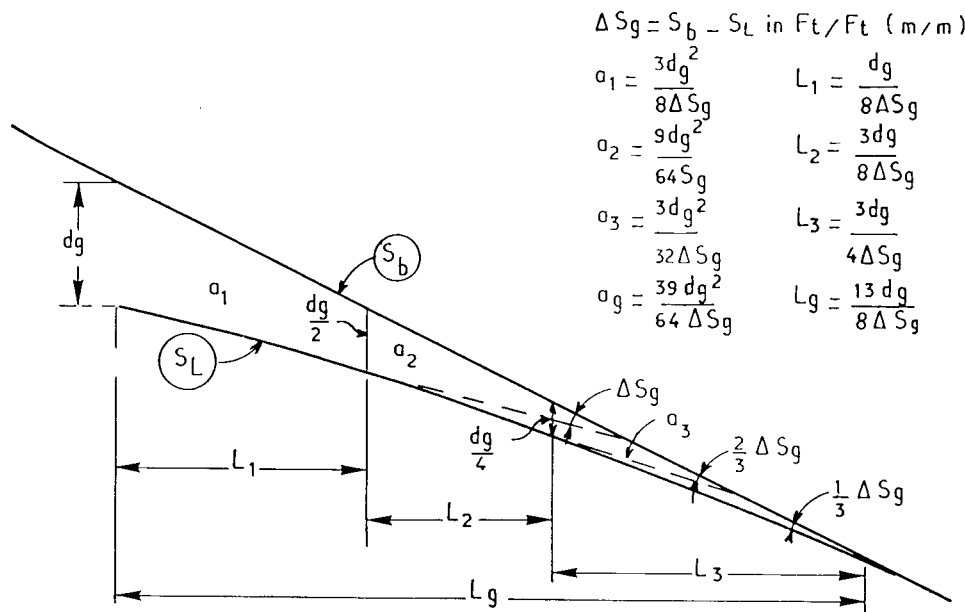


Fig. 5-5

Degraded channel by the three-slope method.

Étude du creusement du lit par la méthode des trois pentes.

S_L : Stable/Limiting slope.

S_L : Pente stable limite.

S_b : Natural streambed slope.

S_b : Pente du lit naturel.

d_g : Depth of degradation at the dam.

d_g : Profondeur des dégradations au barrage.

The next step in degradation computations by the stable slope method is determination of the average channel hydraulic properties for the dominant discharge. These data can usually be obtained from the tailwater study that has been prepared for the dam. The properties of all the tailwater cross sections when carrying the dominant discharge are averaged to arrive at a generalized cross section which will be representative of the degradation reach. The water surface slope may be assumed equal to the hydraulic gradient.

The volume of material to be removed by the stable slope method can be determined in several ways. From Fig. 5-5 it may be expressed by :

$$V = A_T B \quad (14)$$

where :

V : volume of material to be degraded in m^3 ,

A_T : longitudinal area of degradation in m^2 ,

B : degraded channel width in meters.

If there are no downstream controls or no limit to the length (L) for degradation, the two ways to compute the volume are : 1) assume the river will pick up a load of coarse sediment (> 0.062 mm) equal to that portion of the historic sediment load

supérieur à 0,062 mm, du débit solide antérieur, ou 2) calculer le débit sortant du tronçon creusé, d'après une courbe d'évaluation des sédiments, suivant la méthode de la courbe des débits classés. Dans le second cas, la courbe d'évaluation des sédiments doit être définie en utilisant une ou plusieurs des équations de débit de charriage et la courbe des débits classés des évacuations de la retenue prévues.

En remaniant l'équation (14), on peut obtenir la surface longitudinale :

$$A_T = \frac{V}{B} \quad (15)$$

Une fois qu'une valeur a été trouvée pour A_T , il est possible de calculer la profondeur de creusement en utilisant l'équation suivante :

$$D = \left(\frac{64 A_T \Delta S}{39} \right)^{1/2} \quad (16)$$

dans laquelle :

ΔS : différence entre la pente existante et la pente stable, et la longueur du tronçon creusé peut être calculé comme suit :

$$L = \frac{13 D}{8 \Delta S} \quad (17)$$

Si on prévoit que le creusement latéral sera un facteur significatif, une étude supplémentaire est nécessaire pour déterminer la largeur de creusement du lit. Comme une partie des matériaux proviendront des berges du cours d'eau, le creusement vertical ne sera généralement pas aussi important. Il faut toujours être attentif aux mouvements latéraux quand les rives sont constituées des mêmes matériaux que le lit et qu'il n'y a pas beaucoup de végétation pour les retenir. Les rapports de Lara et Pemberton [65] et du Bureau of Reclamation [67, 68] fournissent des informations supplémentaires pour ces conditions.

Si un contrôle permanent est prévu en un point du tronçon en cours de creusement, on peut utiliser directement l'équation (16) pour obtenir la profondeur de creusement.

La méthode de la pente stable ou des trois pentes, servant au calcul de la profondeur de creusement au niveau du barrage et à la détermination du profil du lit creusé, est basée sur la réalisation des trois hypothèses suivantes :

1. Le tronçon de creusement est suffisamment uniforme pour permettre d'utiliser une pente et des profils transversaux moyens sur tout le tronçon.
2. Les matériaux du lit et des rives sont suffisamment semblables sur tout le tronçon pour qu'on puisse utiliser une composition moyenne, et le lit et les rives ne comportent aucun obstacle non affouillable pouvant empêcher le cours d'eau d'atteindre sa section moyenne à la pente stable.
3. Le creusement sera tel que la composante verticale prédominera et le mouvement horizontal sera limité à l'effondrement des rives résultant du creusement vertical.

Des modèles physiques hydrauliques de transport solide ont également été utilisés par de nombreux chercheurs pour prévoir avec précision le creusement en aval des barrages.

> 0.062 mm, or 2) compute the outflow from the degraded reach by a sediment-rating curve, flow-duration curve method. In the second case, the sediment-rating curve would be defined by use of one or more of the bedload equations and the flow-duration curve of anticipated reservoir releases.

By rearranging equation 14 the longitudinal area may be found :

$$A_T = \frac{V}{B} \quad (15)$$

Once a value has been found for A_T , the depth of degradation may be computed using the following equation :

$$D = \left(\frac{64 A_T \Delta S}{39} \right)^{1/2} \quad (16)$$

where :

ΔS : The difference between the existing slope and the stable slope, and the length of the degraded reach can be computed by :

$$L = \frac{13 D}{8 \Delta S} \quad (17)$$

If it is anticipated that lateral degradation will be a significant factor, additional study will be necessary to determine the degraded channel width. Because part of the material will be coming from the streambanks, the extent of vertical degradation will ordinarily not be as great. Lateral movement should always be suspect when the banks are composed of the same material as the bed and there is not a great deal of vegetation to hold them. Lara and Pemberton [65] and Bureau of Reclamation reports [67, 68] provide additional information for these conditions.

If a permanent control exists at some point within the degradation reach, equation 16 may be used to solve for the depth of degradation directly.

The three-slope or stable slope method for computing the depth of degradation at the dam and the degraded channel profile are based on satisfying the following assumptions :

1. The degradation reach is sufficiently uniform to permit the use of average cross sections and slope throughout the reach.
2. The bed and bank material throughout the reach is similar enough that an average composition can be used and that there are no existing non-erodible barriers in the bed or banks to prevent the stream from attaining the average section at the stable slope.
3. The degradation will be such that the vertical component will predominate and horizontal movement will be limited to bank sloughing resulting from vertical degradation.

Physical hydraulic sediment transport models have also been used to accurately predict downstream degradation by many investigators.

5.4.2. Remblaiement

Le remblaiement se produit souvent en aval de la zone de creusement. Il a lieu quand les crues sont fortement atténuées par la retenue amont. Des débits de pointe plus faibles sont donc en équilibre avec des profils en travers plus petits, et le lit se rehausse ainsi que les berges. Quand des crues exceptionnelles surviennent, l'effet d'atténuation est moins marqué, et une inondation et un affouillement importants tendent à se manifester car le rétrécissement du lit ne permet plus désormais de canaliser les grands débits.

Comme les sédiments les plus fins sont seulement évacués des grandes retenues et que des matériaux grossiers du lit sont pris en aval du barrage, la granulométrie que l'on rencontre diffère beaucoup de celle des rivières que rien n'est venu troubler. Le débit solide manque de particules de taille moyenne et la répartition des dépôts dans le lit majeur est largement modifiée. Les particules grossières se déposent rapidement quand la vitesse du courant diminue, alors que les fines particules ne se déposent pas avant que la vitesse d'écoulement de l'eau ne soit devenue extrêmement faible. Aussi, l'existence d'un barrage peut-elle changer la texture des sédiments du lit majeur.

Des changements écologiques importants se sont produits dans des lits majeurs en Afrique du Sud. Ils ont été principalement amorcés par des changements de l'équilibre des eaux mais ils ont été également influencés par des modifications de la répartition des dépôts.

5.5. UTILISATION DES SÉDIMENTS ÉVACUÉS

Que faire en dernier lieu des sédiments dragués? Cette question est importante sur le plan économique et écologique. Dans le passé, des sédiments dragués ont été rejetés dans le cours d'eau, à l'aval du barrage, ou transportés jusqu'à la zone de dépôt la plus proche sans tenir compte des problèmes d'ordre esthétique ou d'autres impacts écologiques éventuels. Le rejet dans le lit aval peut entraîner des périodes de turbidité plus élevée que d'ordinaire et pouvant être préjudiciable à la flore et à la faune et aux activités de loisirs. De plus, les utilisateurs d'eau à l'aval risquent de se plaindre de cette turbidité supérieure à la normale. La mise en dépôt des alluvions peut conduire à d'horribles tas de déblais dont le drainage risque de polluer les eaux locales superficielles et souterraines.

De nombreux pays ont mis en valeur des terres agricoles en aménageant des terrains bas ou marécageux par utilisation sélective des alluvions draguées. Les Chinois ont créé des terres agricoles de valeur à l'extérieur des digues latérales des rivières en utilisant les matériaux dragués dans les chenaux de navigation, méthode appelée le « colmatage ». Ces terres servent également de bermes de protection des digues de la rivière.

Plusieurs pays ont maintenant une réglementation relative à la qualité de l'eau, qui interdit le retour des matériaux dragués au cours d'eau d'origine. Aux États-Unis, des projets d'endiguement total du mélange d'eau et d'alluvions provenant des opérations de dragage ont été mis au point. Le principe de base consiste à disposer d'un périmètre endigué constituant une surface suffisante pour permettre l'évaporation de l'eau sortant des matériaux qui servent alors de remblai. L'établissement de végétation, à un stade précoce, pour accroître l'élimination de l'eau par évapotranspiration est une pratique courante.

5.4.2. Aggradation

Aggradation often occurs downstream of the region of degradation. This happens when floods are strongly attenuated by the upstream reservoir. Lower peak discharges are thus in equilibrium with smaller cross-sectional areas, and bed buildup as well as bank buildup occur. When exceptional floods do occur the attenuation effect is less marked and severe flooding and scouring tend to develop as the constricted channel cannot accommodate the high discharges any more.

As only the smallest sediment particles are discharged from major reservoirs and coarse bed material is picked up downstream of a reservoir, the size distribution that develops differs greatly from that of the undisturbed river. This load lacks medium sized particles, and deposition patterns of flood plains change significantly. The coarse particles are deposited rapidly when flow velocities decrease, whereas the small particles are only deposited under conditions where flow velocities become extremely small. Thus the texture of the sediments on the flood plain may change due to the existence of a dam.

Significant ecological changes have occurred on flood plains in South Africa. These were triggered mainly by changes in the water balance but were also influenced by changes in sediment deposition patterns.

5.5. DISPOSAL OF EVACUATED SEDIMENTS

The ultimate disposition of dredged sediments is an issue of economic and environmental importance. In the past, dredged sediments have been released to the channel below the dam or discharged to the closest disposal area without consideration for aesthetics or other possible ecological impacts. Discharge to the downstream channel can result in periods of unusually high turbidity which would be detrimental to instream biology and recreation. Additionally, subsequent downstream water users may object to the higher turbidity levels. Land based disposal can lead to unsightly spoil piles and drainage from the spoiled material can adversely effect local surface and ground water.

Many countries have developed valuable agricultural land by building low lying or marshy land by selective disposal of dredged material. The Chinese have developed valuable farmland on the outside of river training dikes with material dredged from the navigation channel, a process referred to as "warping". These lands also serve as a protective berm for the river dikes.

Many countries now have water quality regulations which prohibit the return of dredged material to the original stream. In the USA, schemes of total containment of the water and sediment mixture arising from dredging operations have been developed. The basic concept consists of a diked perimeter which includes a volume such that the surface area is sufficient to evaporate the incoming water leaving the solids behind as fill material. Establishing vegetation at an early stage to enhance the water loss through evapotranspiration is a common practice.

L'utilisation du dragage pour rétablir la capacité de stockage antérieure des retenues s'est très rarement révélée économique aux États-Unis. La principale exception porte sur les retenues de maîtrise de l'alluvionnement en période de crue, implantées dans des bassins hydrographiques à pentes raides en amont de zones très peuplées. Ces retenues sont destinées à maîtriser les apports solides; l'eau en est évacuée aussitôt que possible après un orage. On laisse sécher les matériaux déposés et on les sort de la retenue avec des équipements mécaniques terrestres. Comme la région environnante est très peuplée, les sédiments retirés peuvent servir de matériaux de remblai sur les chantiers de construction du voisinage.

Dredging for purposes of restoring water storage volume has seldom been found to be economical in the USA. The primary exception are flood control debris basins in steep sloped watersheds above densely populated areas. These debris reservoirs are designed for sediment control and the water is evacuated as soon as possible following a storm event. The deposited material is allowed to dry and is removed as soon as possible with land based equipment. Because of the populous surrounding areas the removed sediment has value as fill material for nearby construction activities.

6. REFERENCES

6.1. DIRECT CITATIONS - DOCUMENTS CITÉS

1. Federal Inter-Agency Sedimentation Project, " A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams ", report No. 14, determination of fluvial sediment discharge, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minnesota, 1963.
2. ISO : " Liquid flow measurements in open channels - methods for measurement of suspended sediment ", International Organization for Standardization, Ref. No. ISO 4363, Geneva, 1977a.
3. ISO : " Liquid flow measurements in open channels - functional requirements and characteristics of suspended sediment load samplers ", International Organization for Standardization, Ref. No. ISO 3716, Geneva, 1977b.
4. IAHS : " Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium ", Publication No. 133, Florence, Italy, 1971.
5. MILLER C. R. : " Analysis of Flow-Duration, Sediment Rating Curve Method of Computing Sediment Yield ", US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1951.
6. ROOSEBOOM A., ANNANDALE G. W. : " Techniques Applied in Determining Sediment Loads in South African Rivers ", Proceedings of the Florence Symposium, IAHS, 1981.
7. COLBY B. A., HEMBREE C. H. : " Computations of Total Sediment Discharge Niobrara River Near Cody, Nebraska, US Department of the Interior ", *Geological Survey Water Supply Paper*, 1357, 1955.
8. HELLEY E. J., WINCHELL SMITH : " Development and calibration of a pressure difference bedload sampler ", USGS Open-File Report, 1971.
9. ASCE (1975), " Sedimentation Engineering ", *American Society of Civil Engineering Manual* No. 54, Editor V. A. Vanoni.
10. MEYER-PETER E., MULLER R. : " Formulas for Bedload Transport », the Second Meeting of the International Association for Hydraulic Structure Research, 1948.
11. SCHOKLITSCH S., SHULITS : " The Schoklitsch Bedload Formula ", *Engineering*, Vol. 139, 1935.
12. ACKERS P., WHITE W. R. : " Sediment Transport : New Approach and Analysis ", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. HY11, 1973.
13. PEMBERTON E. L. : Einstein's Bedload Function Applied to Channel Design and Degradation, Chapter 16, Sedimentation, Symposium to Honor Prof. H. A. Einstein, H. W. Shen, editor, 1972.
14. ENGELUND F., HANSEN E. : *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Teknisk Forlag, Denmark, 1972.

15. YANG C. T. : *Incipient Motion and Sediment Transport*, ASCE, Vol. 99, No HY10, 1073.
16. YANG C. T. : " Unit Stream Power Equation for Gravel ", ASCE, *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 110, No. HY12, 1984.
17. PARKER G., KLINGEMAN P. C. : *Bedload and Size Distribution of Paved Gravel Bed Stream*, ASCE, Vol. 108, No. HY4, 1982.
18. LAURSEN E. M. : " The Total Sediment Load of Streams ", ASCE, *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 54, No. HY 1, 1958.
19. BAGNOLD R. A. : " An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics ", *US Geological Survey Professional Paper*, 422-J, 1966.
20. STRAND R. I., PEMBERTON E. L. : " Reservoir Sedimentation ", Technical Guideline for Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1982.
21. PEMBERTON E. L. : " Reservoir Sedimentation ", prepared for US-Japan Binational Seminar on Sedimentation and Erosion, Honolulu, Hawaii, 1978.
22. LARA J. M., SANDERS J. I., " The 1963-64 Lake Mead Survey ", US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1970.
23. Pacific Southwest Inter-Agency Committee : " Factors affecting sediment yield in the Pacific Southwest area ", 1968.
24. WISCHMEIER W. H., SMITH D. D. : " Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains ", USDA, ARS, *Agricultural Handbook*, 282, 1965.
25. JANSEN J. M. L., PAINTER R. B. : "Predicting Sediment Yield from Climate and Topography ", *Journal of Hydrology*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1973.
26. FAO : Conservation Guide No. 1, *Guidelines for Watershed Management*, FAO Organization of UN, Rome, 1977.
27. FOSTER G. R., MCCOOL D. K., RENARD K. G., MOLDENHAUER W. C. : " Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units ", *Journal of Soil and Water Conservation*, November-December, 1981.
28. Bureau of Reclamation : *Design of Small Dams*, Appendix H, Sedimentation, US Department of the Interior, 1974.
29. BRUNE G. M. : " Trap Efficiency of Reservoirs ", *Transactions of American Geophysical Union*, Vol. 34, No. 3, 1953.
30. CHURCHILL M. A. : " Discussion of Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data, by L. C. Gottschalk, Proceedings of Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, Colorado, 1948.
31. MURTHY, B. N. : " Life of Reservoir ", Technical Report No. 19, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, 1977.
32. MILLER C. R. : " Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations ", US Bureau of Reclamation, 1953.
33. LARA J. M., PEMBERTON E. L. : Initial Unit Weight of Deposited Sediments, Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Jackson, Mississippi, US Department of Agriculture, Miscellaneous Publication No. 970, 1963.

34. LANE E. W., KOELZER V. A. : Density of Sediment Deposited in Reservoirs, Report No. 9, Federal Inter-Agency Sedimentation Project, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minnesota, 1943.
35. LARA J. M. : " Revision of the Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs ", Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1962.
36. BORLAND W. N., MILLER C. R. : " Distribution of Sediment in Large Reservoirs ", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 84, 1958.
37. ROOSEBOOM A., ANNANDALE G. W. : " Sediment Movement Through Reservoirs, Transactions of the Fourteenth International Congress on Large Dams ", ICOLD, 1982.
38. NIZERY A., BONNIN J. : « Observations systématiques de courants de densité dans une retenue hydro-électrique », Proc. Minnesota Int. Hydraul. Conv., 1953.
39. ROUSE H. : " Modern conceptions of the mechanics of turbulence ", *Trans. Am. Soc., Civil Engineers*, Vol. 102, 1973.
40. ROOSEBOOM A. : " Open channel fluid mechanics ", Technical Report No. 62, Department of Water Affairs, South Africa, 1974.
41. HOWARD C. S. : " Density Currents in Lake Mead ", Int. Ass. Hydraul. Res., Int. Hydraul. Conv., 1953.
42. ROOSEBOOM A. : " Sedimentneerlating in damkomme (Sediment deposition in reservoirs) ", Technical Report No. 63, Department of Water Affairs, South Africa, 1975.
43. QIAN Ning : " Reservoir Sedimentation ", Institute on Fluvial Process, Fort Collins, Colorado, 1982.
44. ZHANG Hao *et al.* : " Regulation of sedimentation in some medium- and small-sized reservoirs on heavily silt-laden streams in China ", Q 47-R 32, 12th ICOLD Congress, Mexico, 1976.
45. RIENOUSSL K., SCHNELLE P. : " Sedimentation of small reservoirs in the High Alps ", Q 54-R 5, Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
46. Un Groupe de travail du Comité français des grands barrages : « Contrôle de l'alluvionnement des retenues, quelques exemples types Q 54-R 34 », Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
47. BUTTLING S., SHAW T. L. : " Predicting the Rate and Pattern of Storage Loss in Reservoirs ", Q 40, R 37, Eleventh ICOLD Congress, Madrid, 1973.
48. ROOSEBOOM A., MULKE F. J. : " Erosion Initiation ", Proc. symp. on recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield, IAHS Publication No. 137, 1982.
49. PARTL R. : " Quantitative Analyses of Reservoir Sedimentation ", Q 47-R 17, 12th ICOLD Congress, Mexico, 1976.
50. GRAF W. H., " Hydraulics of sediment transport ", McGraw Hill, 1971.
51. TAKASU S. : " Hydraulic design and model tests on a sediment release facility of Unazuki Dam, Q 54-R 3", Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
52. Un Groupe de travail du Comité français des grands barrages : « Problèmes de sédimentation dans les retenues », Q 47-R 30, 12th ICOLD Congress, Mexico, 1976.

53. MURRAY J. A. : " Nizamsagar Project, Problems of Sedimentation Effects on Irrigated Area and Remedial Measures ", Q 47-R 14, 12th ICOLD Congress, 1976.
54. BACHMANN R. W. : " The Role of Agricultural Sediments and Chemicals in Eutrophication ", *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 52, No. 10, 1980.
55. SCHREIBER J. D., RAUSCH D. C., OLNESS A. : " Phosphorus Concentrations and Yields in Agricultural Runoff as Influenced by a Small Flood Detention Reservoir ", Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE, Minneapolis, Minnesota, 1980.
56. HEINEMANN H. G., HOLT R. F., RAUSCH D. L. : " Sediment and Nutrient Research on Selected Corn Belt Reservoirs, Man-Made Lakes : Their Problems and Environmental Effects ", American Geophysical Union, Washington, DC, 1973.
57. EDMONSON W. T., LEHMAN J. T. : " The Effect of Changes in the Nutrient Income on the Condition of Lake Washington ", *Limnology and Oceanography*, Vol. 26, No. 1, 1981.
58. THORNTON K. W., KENNEDY R. H., CARROLL J. H., WALKER W. W., GUNKEL R. C., ASHBY S. : " Reservoir Sedimentation and Water Quality - An Heuristic Model ", Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE, Minneapolis, Minnesota, 1980.
59. HERRMANN S. J., MAHAN K. I. : " Effects of Impoundment on Water and Sediment in the Arkansas River at Pueblo Reservoir ", US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1977.
60. REYNOLDS R. C. Jr. : " Polyphenol Inhibition of Calcite Precipitation in Lake Powell ", *Limnological Oceanography*, Vol. 23, No. 4, 1978.
61. LOWE-McCONNELL, ROSEMARY H. : " Reservoirs in Relation to Man-Fisheries, Man-made Lakes : Their Problems and Environmental Effects ", American Geophysical Union, Washington, DC, 1973.
62. MANCY Khalil H. : " The Aswan High Dam and Lake Nasser ", Proceedings of Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE, Minneapolis, Minnesota, 1980.
63. KINAWY I. Z., EL-GHAMRY O. A. : " Some Effects of the High Dam on the Environment ", Q 40, R 59, Eleventh ICOLD Congress, Madrid 1973.
64. KINAWY I. Z., WAFA T. A., LABIB A. H., SHENOUDA W. K. : Q 40, R 54, Eleventh ICOLD Congress, Madrid, 1973.
65. LARA J. M., PEMBERTON E. L. : " Guide for Computing Degradation ", Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1982.
66. PEMBERTON E. L. : " Channel Changes in the Colorado River Below Glen Canyon Dam ", Proceedings of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, 1976.
67. Bureau of Reclamation : " Stable Channel Profiles - Hydraulic Laboratory ", Report No. Hyd. 325, Denver, Colorado, 1951.
68. Bureau of Reclamation : " Progress Reports on Results of Studies on Design of Stable Channels ", Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 352, Denver, Colorado, 1952.

6.2. OTHER REFERENCES - AUTRES RÉFÉRENCES

69. ANNANDALE G. W. : " Reservoir Sedimentation ", Elsevier Science Publishers B. V., 1987.
 70. BETTES R., WHITE W. R. : " Mathematical Simulation of Sediment Movement in Streams ", Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 71, September 1981.
 71. BANFOUS L. *et al.* : « Définition des mesures contre l'envasement de la retenue sur l'Oued Neckor au Maroc », Q 54-R 2, Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
 72. CHANG H. H. : Fluvial Processes in River Engineering. John Wiley & Sons, 1988.
 73. CROLEY R. E., RAJA RAO K. N., KAREM F. : " Reservoir Sedimentation Model with Continuing Distribution, Compaction, and Sediment Slump ", Iowa Institute of Hydraulic Research, 1978.
 74. GARDE R. J., SWAMEE P. K. : " Analysis of Aggradation Upstream of a Dam ", Proceedings of International Symposium on River Mechanics, IAHR, 1973.
 75. GRAF W. H. : " The Hydraulics of Reservoir Sedimentation ", *Water Power and Dam Construction*, April 1983.
 76. JANCOLD : Guideline on Sedimentation of Reservoirs, Tokyo, Japan, 1981.
 77. KARIM F., CROLEY T. E., KENNEDY J. F. : " A Numerical Model for Computation of Sedimentation in Lakes and Reservoirs ", Iowa Institute of Hydraulic Research, 1980.
 78. KOBILKA J. G., GAUCK H. H. : " Sediment Regime in the Backwater Ponds of the Austrian Run-of-River Plants on the Danube ", Q 54-R 10, Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
 79. KRUMDIECK A., CHAMOT P. : " Sediment Flushing at the Santo Domingo Reservoir ", *Water Power and Dam Construction*, December, 1979.
 80. LOPEZ J. L. : " Mathematical Modeling of Sediment Deposition in Reservoirs, Hydrology ", Paper 95, Colorado State University, Ft. Collins, CO, USA, 1978.
 81. OKADA T., BABA K. : " Sediment Release Plan at Sakuma Reservoir ", Q 54-R 4, Fourteenth ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982.
 82. SCHEURLEIN H. : " Sedimentation of Reservoirs - Methods of Prevention, Techniques of Rehabilitation ", First Iranian Symposium on Dam Engineering, 1987.
 83. SIMONS Li and Associates : " Engineering Analysis of Fluvial Systems ", Ft. Collins, CO, USA, 1982.
 84. SZECHOWYER R. W., QURESHI M. M. : " Sedimentation in Mangla Reservoir ", *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Vol. 99, 1973.
 85. Task Committee for Preparation of Manual on Sedimentation : " The Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division ", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. HY4, 1973.
-

86. THOMAS W. A., MCANALLY W. H. : “ User’s Manual for the Generalized Computer Program System - Open Channel Flow and Sedimentation TABS-2 ”, US Army Corps of Engineers, 1985.
87. Unesco : “ Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs ”, Belgrade, Yugoslavia, 1985.
88. YANG C. T. : “ Minimum Unit Stream Power and Fluvial Hydraulics ”, ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 102, No. HY7, 1976.
89. YANG C. T., MOLINAS A. : “ Sediment Transport and Unit Stream Power Function ”, ASCE, Vol. 108, No. HY6, 1982.

7. GLOSSAIRE

Les définitions suivantes sont données pour permettre une compréhension uniforme des termes utilisés dans le présent document. Pour les mots ou termes figurant dans le Glossaire CIGB (Bulletin 32a) et désignés par (*), les définitions sont celles données dans ce Glossaire. Pour les autres mots ou termes, les définitions ont été tirées des recommandations préparées pour l'ASTM (American Society of Testing and Materials).

Affouillement : Agrandissement de la section d'écoulement par enlèvement de matériaux sous l'action du fluide en mouvement.

Alluvial (alluvionnaire) : Concerne les alluvions déposées par une rivière ou un écoulement d'eau.

Alluvionnement : Terme utilisé dans un sens large, qui concerne les cinq phénomènes (actions) responsables de la formation des roches sédimentaires : (1) altération (dégradation), (2) détachement (séparation), (3) transport, (4) dépôt (alluvionnement) et (5) diagenèse; ainsi que la décantation des particules en suspension qui sont plus lourdes que l'eau.

Appareil de prélèvement d'échantillons (préleveur d'échantillons, échantillonneur) de matériaux charriés : Appareil pour prélever des échantillons de matériaux charriés.

Appareil de prélèvement d'échantillons (préleveur d'échantillons, échantillonneur) de matériaux du lit : Appareil pour prélever des échantillons de matériaux du lit.

Appareil de prélèvement d'échantillons (préleveur d'échantillons, échantillonneur) de sédiments en suspension, avec intégration suivant la profondeur : Appareil capable de prélever un mélange eau-sédiment, à la même vitesse, à mesure que la prise est déplacée à travers l'écoulement : de ce fait, un tel appareil permet une intégration, suivant la profondeur.

Apports solides : Total de sédiments provenant d'un bassin versant dans une période de temps donnée. Il comprend les matériaux charriés et les matériaux en suspension et s'exprime en général en termes de masse ou de volume par unité de temps.

Argile : Voir tableau 7-1.

Bassin versant (*) : Pour un point donné d'une rivière, bassin drainé naturellement jusqu'en ce point (Voir ligne de partage des eaux).

Charge en sédiments : Terme général qui se rapporte aux matériaux en suspension et/ou aux matériaux charriés. Il n'est pas synonyme de débit ou de concentration (voir matériaux charriés et sédiments [matériaux] en suspension).

(On peut également utiliser l'expression « **débit solide** » sans y associer la notion de quantité par unité de temps.)

Charge en suspension : Partie de la charge en sédiments, constituée par des sédiments (matériaux) en suspension.

(On peut également utiliser l'expression « **débit solide en suspension** » sans y associer la notion de quantité par unité de temps.)

Tableau 7-1 : Classification granulométrique des sédiments

Désignation	Millimètres	Microns
Blocs	> 256	—
Cailloux	256 à 64	—
Gravier	64 à 2	—
Sable très grossier	2,0 à 1,0	2 000 - 1 000
Sable grossier	1,0 à 0,50	1 000 - 500
Sable moyen	0,50 à 0,25	500 - 250
Sable fin	0,25 à 0,125	250 - 125
Sable très fin	0,125 à 0,062	125 - 62
Silt grossier	0,062 à 0,031	62 - 31
Silt moyen	0,031 à 0,016	31 - 16
Silt fin	0,016 à 0,008	16 - 8
Silt très fin	0,008 à 0,004	8 - 4
Argile grossière	0,004 à 0,0020	4 - 2
Argile moyenne	0,0020 à 0,0010	2 - 1
Argile fine	0,0010 à 0,0005	1 - 0,5
Argile très fine	0,0005 à 0,00024	0,5 - 0,24
Argile colloïdale	< 0,00024	< 0,24

Chenal (*) : Terme général pour n'importe quel lit naturel ou artificiel dans lequel s'effectue un écoulement à surface libre.

Concentration des sédiments (alluvions) - en masse : Rapport de la masse sèche des sédiments (alluvions) contenus dans un mélange eau-sédiments (alluvions) à la masse du mélange.

Concentration pondérée par le débit : Masse sèche (poids) de sédiments (alluvions) par unité de volume du débit de la rivière, ou rapport du débit de sédiments, en masse sèche, au débit du mélange eau-sédiments, en masse.

Courant de densité : Courant à forte turbidité et relativement dense, qui se déplace en général le long du lit d'une masse d'eau stagnante.

Creusement : Processus géologique conduisant à l'abaissement des niveaux des lits mineurs, des lits majeurs de rivières et des fonds d'autres chenaux, par enlèvement de matériaux. C'est le contraire de « remblaiement ».

Débit de la rivière : Quantité d'eau passant par un profil en travers de la rivière par unité de temps (le débit contient des matières dissoutes et des sédiments).

Débit solide de charriage : Quantité de matériaux charriés passant dans une section transversale de la rivière par unité de temps.

Débit solide : Masse ou volume de sédiments (habituellement, masse) traversant un profil en travers d'une rivière dans une unité de volume. Le terme peut être précisé, par exemple, sous la forme de débit solide en suspension, débit solide de charriage, ou débit solide total.

Débit solide mesuré : Quantité de sédiments (alluvions) traversant un profil en travers d'une rivière par unité de temps, calculée à partir des renseignements fournis par les prélèvements d'échantillons. Le prélèvement au moyen d'échantillonneurs de sédiments en suspension donne le débit solide mesuré équivalant au débit solide en suspension mesuré. Celui-ci est calculé en faisant le produit de (1) la concentration pondérée par le débit, déduite des échantillons de sédiments en suspension, par (2) le débit liquide total passant par le profil en travers considéré et par (3) une constante de conversion en unités appropriées. Ainsi, le débit solide en suspension, mesuré sur le profil en travers considéré, comprend tous les sédiments en suspension se déplaçant dans la zone de mesure, mais, par contre, seulement une partie des sédiments en suspension se déplaçant dans la zone non mesurée lorsque les concentrations dans les zones mesurées et non mesurées sont différentes (un gradient de concentration existe).

Débit solide non mesuré : Différence entre le débit solide total et le débit solide en suspension mesuré.

Débit solide total : Quantité totale de sédiments (matériaux solides) passant par un profil en travers par unité de temps.

Delta : Dépôt de sédiments (alluvions) formé lorsque de l'eau en mouvement (par exemple l'eau provenant d'une rivière à son embouchure) est ralentie par une masse d'eau stagnante.

Dépôt : Action mécanique ou chimique par laquelle des sédiments (alluvions) s'accumulent dans un endroit au repos.

Diamètre moyen : Dimension des sédiments (alluvions) telle que la moitié de la masse des matériaux est constituée de particules de dimensions supérieures au diamètre moyen et l'autre moitié de particules de dimensions inférieures au diamètre moyen.

Dimension des particules (grains) : Dimension linéaire, appelée en général « diamètre », utilisée pour caractériser la taille d'une particule. La dimension peut être déterminée par une quelconque des différentes techniques, comprenant la sédimentation, le tamisage, la mesure micrométrique, ou la mesure directe (voir tableau 7-1).

Échantillon intégré suivant la profondeur : Échantillon du mélange eau-sédiment, pondéré par le débit (pondéré par la vitesse), prélevé sur une ou plusieurs verticales, conformément à la technique de l'intégration suivant la profondeur. Le débit de tout paramètre de l'échantillon, s'exprimant sous forme d'une concentration, peut être obtenu en faisant le produit de la concentration par le débit liquide correspondant à l'échantillon.

Écoulement : Écoulement provenant d'un bassin versant par l'intermédiaire des lits du réseau hydrographique — parfois subdivisé en écoulement de surface (ruissellement), écoulement souterrain et percolation.

En Am., « watershed » a le même sens que « bassin versant » et il est utilisé avec ce sens dans le présent bulletin : toutes les terres limitées par une ligne continue de partage des eaux définissant un **bassin hydrographique** (voir bassin versant).

Érosion des berges de la rivière : Enlèvement de matériaux des berges sous l'action de l'écoulement de l'eau et par éboulement des berges de la rivière.

Érosion : Usure de la surface du sol par détachement et déplacement de fragments de terre et de roche sous l'action de l'eau en mouvement et d'autres agents géologiques.

Granulométrie : Répartition, en fréquences, des quantités relatives de particules d'un échantillon, rentrant dans des plages de dimensions définies, ou répartition, en fréquences cumulées, des quantités relatives de particules plus fines ou plus grosses que les dimensions définies. Les quantités relatives sont, en général, exprimées en pourcentages de masse.

Gravier : Voir tableau 7-1.

Intégration suivant la profondeur : Méthode consistant à prélever un mélange eau-sédiment en divers points répartis sur toute la profondeur échantillonnée, de sorte que chaque point de prélèvement intervient dans la mesure proportionnellement à la vitesse du courant au point considéré. Cette méthode donne un échantillon pondéré par le débit. En général, l'intégration suivant la profondeur s'effectue en déplaçant verticalement, à une vitesse constante suffisamment lente, un échantillonneur intégrant suivant la profondeur — ou par point; toutefois, l'intégration suivant la profondeur peut être également réalisée au moyen d'échantillonneurs à entailles verticales.

Ligne de partage des eaux* : Ligne de séparation de deux bassins versants.

Lit frontal (couche frontale du lit) : Couches inclinées de matériaux sableux déposés sur (ou le long de) un talus frontal relativement raide qui s'avance. Un lit frontal recouvre progressivement un lit inférieur et, à son tour, est recouvert par un lit supérieur.

Lit inférieur (couche inférieure du lit, couche à l'aval) : Matériaux à grains fins (généralement des silts et des argiles) déposés lentement sur le lit d'une masse d'eau tranquille et pouvant, dans le temps, être recouverts par des lits (couches) frontaux et des lits (couches) supérieurs.

Lit supérieur (couche supérieure du lit, couche à l'amont) : Couche de sédiments déposés sur la partie supérieure d'un delta qui s'avance et qui forme une surface continue avec la plaine alluviale du côté de la terre.

Masse volumique : Masse d'une substance par unité de volume, en kg/l ou t/m³. On utilise ρ_s pour la masse volumique de particules solides, ρ_w pour l'eau, ρ_d pour des sédiments (alluvions) secs avec vides, ρ_{sat} pour des sédiments saturés, ρ_{wet} pour des sédiments humides et ρ_b pour des sédiments immergés (ρ diminué de la poussée d'Archimède).

Matériaux charriés (charge de charriage) : Matériaux se déplaçant sur le lit, ou près du lit de la rivière, par roulement, glissement, et faisant parfois de brèves incursions dans l'écoulement sur une hauteur de quelques diamètres au-dessus du lit.

(On peut également utiliser l'expression « **débit solide de charriage** » ou « **débit solide charrié** », sans y associer la notion de quantité par unité de temps).

Matériaux du lit : Mélange des sédiments (alluvions) composant le lit de la rivière. Dans les rivières alluviales, les particules de matériaux du lit sont susceptibles d'être déplacées à tout moment ou lors de certains autres écoulements.

Matériaux fins : Particules de dimensions plus petites que celles des particules se trouvant en grande quantité dans les matériaux du lit; ce sont en général des silts et des argiles (particules de dimensions inférieures à 0,062 mm).

Pavage : Formation d'une couche résistante, constituée d'éléments relativement gros, résultant de l'enlèvement des éléments plus fins par érosion.

Profondeur non mesurée : Partie non mesurée de la verticale de prélèvement d'échantillons; elle est comprise, en général, entre 8 et 15 cm du lit de la rivière et dépend du type d'échantillonneur utilisé.

Remblaiement : Processus géologique conduisant à la surélévation des niveaux des lits mineurs, des lits majeurs de rivières et des fonds d'autres chenaux, par suite de dépôts de matériaux érodés et transportés depuis d'autres zones. C'est le contraire de « creusement ».

Retenue (*) : Lac artificiel ou bassin artificiel dans lequel une grande quantité d'eau est accumulée.

Rivière alluviale : Rivière dont le lit est constitué d'une quantité importante de sédiments (alluvions) transportés par le courant; en général, les variations de débit modifient les formes du lit d'une telle rivière.

Sable : Voir tableau 7-1.

Sédiments (alluvions) cohésifs : Sédiments (alluvions) dont la résistance à un mouvement initial ou à l'érosion dépend principalement des liaisons (cohésion) entre particules.

Sédiments (alluvions) sans cohésion : Sédiments (alluvions) constitués de particules discontinues. Pour des forces d'érosion données, le déplacement de telles particules dépend seulement des caractéristiques de forme, de dimension, de densité et de l'emplacement de la particule par rapport aux particules voisines.

Sédiments (matériaux) en suspension : Sédiments (matériaux) transportés en suspension par un éboulement turbulent ou par un mouvement brownien.

(On peut également utiliser l'expression « **débit solide en suspension** » sans y associer la notion de quantité par unité de temps.)

Sédiments : (1) Particules provenant de roches ou matières biologiques, qui ont pu être transportées par un fluide (2) Matériaux solides en suspension ou déposés dans l'eau.

Silt : Voir tableau 7-1.

Sol : Matériau de surface, minéral et organique, non consolidé, qui a été suffisamment soumis aux actions physiques, chimiques et biologiques et modifié par celles-ci pour supporter de la végétation.

Station de jaugeage (station de mesure) : Profil en travers du lit d'une rivière, choisi pour y effectuer la mesure continue ou périodique d'une ou plusieurs variables en vue de connaître les débits et autres paramètres.

Thalweg (*) :

- a) Ligne joignant les points bas d'une vallée.
- b) Désigne aussi, par extension, dans le langage courant, la vallée elle-même quand elle est étroite et peu profonde.

Turbulence : En termes généraux, mouvement irrégulier d'un écoulement.

Vitesse de chute : Vitesse de chute ou de précipitation d'une particule dans un milieu donné.

Zone de prélèvement d'échantillons : Partie d'un profil en travers supposée être complètement représentée par les échantillons de sédiments (alluvions).

7. GLOSSARY

The following definitions are given to help achieving a uniform understanding of the terms used in these guidelines. For those words or phrases appearing in the ICOLD Glossary (Bulletin 32^a) and marked by (*), the definitions are those given in this Glossary. For other words or phrases, the definitions have been adapted from recommendations being prepared for the American Society of Testing and Materials.

Aggradation : The geologic process by which streambeds, flood plains, and the bottoms of other water bodies are raised in elevation by the deposition of material eroded and transported from other areas. It is the opposite of degradation.

Alluvial : Pertains to alluvium deposited by a stream or flowing water.

Alluvial stream : A stream whose channel boundary is composed of appreciable quantities of the sediments transported by the flow and which generally changes its bed forms as the rate of flow changes.

Armoring : The formation of a resistant layer of relatively large particles resulting from removal of finer particles by erosion.

Bedload : Material moving on or near the streambed by rolling, sliding, and sometimes making brief excursions into the flow a few diameters above the bed.

Bedload discharge : The quantity of bedload passing a transect in a unit of time.

Bedload sampler : A device for sampling the bedload.

Bed material : The sediment mixture of which the bed is composed. In alluvial streams bed-material particles are likely to be moved at any moment or during some future flow condition.

Bed-material sampler : A device for sampling bed material.

Bottomset bed : Fine-grained material (usually silts and clays) slowly deposited on the bed of a quiescent body of water and which may in time be buried by foreset beds and topset beds.

Channel (*) : A general term for any natural or artificial bed for running water having a free surface.

Clay : See table 7-1.

Cohesive sediments : Sediments whose resistance to initial movement or erosion is affected mostly by cohesive bonds between particles.

Concentration of sediment (by mass) : The ratio of the mass of dry sediment in a water-sediment mixture to the mass of the mixture.

Degradation : The geologic process by which streambeds, flood plains, and the bottoms of other water bodies are lowered in elevation by the removal of material from the boundary. It is the opposite of aggradation.

Table 7-1. — Scale of particle sizes for sediment.

Class name	Millimeters	Micrometers
Boulders	> 256	—
Cobbles	256 to 64	—
Gravel	64 to 2	—
Very coarse sand	2.0 to 1.0	2 000-1 000
Coarse sand	1.0 to 0.50	1 000-500
Medium sand	0.50 to 0.25	500-250
Fine sand	0.25 to 0.125	250-125
Very fine sand	0.125 to 0.062	125-62
Coarse silt	0.062 to 0.031	62-31
Medium silt	0.031 to 0.016	31-16
Fine silt	0.016 to 0.008	16-8
Very fine silt	0.008 to 0.004	8-4
Coarse clay	0.004 to 0.0020	4-2
Medium clay	0.0020 to 0.0010	2-1
Fine clay	0.0010 to 0.0005	1-0.5
Very fine clay	0.0005 to 0.00024	0.5-0.24
Colloids	< 0.00024	< 0.24

Delta : A deposit of sediment formed where moving water (as from a stream at its mouth) is slowed by a body of standing water.

Density : The mass of a substance per unit volume, ρ in kg/l or t/m³. Use ρ_s for density of solid particles, ρ_w for water, ρ_d for dry sediment with voids, ρ_{sat} for saturated sediment, ρ_{wet} for wet sediment, and ρ_b for submerged sediment (buoyant weight).

Density current : A highly turbid and relative dense current which usually moves along the bottom of a body of standing water.

Deposition : The mechanical or chemical processes through which sediments accumulate in a resting place.

Depth-integrated sample : A discharge-weighted (velocity-weighted) sample of water-sediment mixture collected at one or more verticals in accordance with the technique of depth integration. The discharge of any property of the sample expressible as a concentration can be obtained as the product of the concentration and the water discharge represented by the sample.

Depth integrating, suspended-sediment sampler : An instrument capable of collecting a water-sediment mixture isokinetically as its intake is traversed across the flow : hence, a sampler suitable for performing depth integration.

Depth-integration : A method of sampling at every point throughout the sampled depth whereby a water-sediment mixture is collected so that the contribution to the sample from each point is proportional to the stream velocity at the point. This yields a discharge-weighted sample. Ordinarily, depth integration is performed by traversing either a depth — or point — integrating sampler vertically at an acceptably slow constant rate; however, depth integration can also be accomplished with vertical-slot samplers.

Discharge-weighted concentration : The dry mass (weight) of sediment in a unit volume of stream discharge, or the ratio of the mass discharge (dry) of sediment to the mass discharge of water-sediment mixture.

Drainage basin (*) : The area which drains naturally to a particular point on a river. (See watershed).

Erosion : The wearing away of the land surface by detachment and movement of soil and rock fragments through the action of moving water and other geological agents.

Fall velocity : The falling or settling rate of a particle in a given medium.

Fine material : Particles of a size finer than the particles present in appreciable quantities in the bed material; normally silt and clay particles (particles finer than 0.062 mm).

Foreset bed : Inclined layers of sandy material deposited upon or along an advancing and relatively steep frontal slope. A foreset bed progressively covers a bottomset bed, and in turn is covered by a topset bed.

Gaging station : A selected cross section of a stream channel where one or more variables are measured continuously or periodically to index discharge and other parameters.

Gravel : See table 7-1.

Measured sediment discharge : The quantity of sediment passing a stream transect in a unit of time that is computed with information derived from sampling. Sampling with suspended-sediment samplers makes the measured sediment discharge the same as the measured suspended-sediment discharge. This is computed as the product of : (1) the discharge-weighted concentration from the suspended sediment samples, (2) the total water discharge through the transect, and (3) an appropriate units-conversion constant. Thus, measured suspended-sediment discharge for the transect includes all of the suspended sediment moving in the sampled zone, but only part of the suspended sediment moving in the unsampled zone whenever spatial concentrations in the sampled and unsampled zones are different (a concentration gradient exists).

Median diameter : The size of sediment such that one-half of the mass of the material is composed of particles larger than the median diameter, and the other one-half is composed of particles smaller than the median diameter.

Noncohesive sediments : Sediments consisting of discrete particles. For given erosive forces, the movement of such particles depends only on the properties of shape, size, and density, and on the position of the particle with respect to surrounding particles.

- Particle size** : A linear dimension, usually designated as “ diameter ”, used to characterize the size of a particle. The dimension may be determined by any of several different techniques, including sedimentation, sieving, micrometric measurement, or direct measurement (See table 7-1).
- Particle-size distribution** : The frequency distribution of the relative amounts of particles in a sample that are within specified size ranges, or a cumulative frequency distribution of the relative amounts of particles coarser or finer than specified sizes. Relative amounts are usually expressed as percentages by mass.
- Reservoir (*)** : An artificial lake, basin or tank in which a large quantity of water can be stored.
- Runoff** : Flow that is discharged from the area by stream channels — sometimes subdivided into surface runoff, ground-water runoff, and seepage.
- Sampled zone** : That part of a transect presumed to be wholly represented by sediment samples.
- Sand** : See table 7-1.
- Scour** : The enlargement of a flow section by the removal of boundary material through the action of the fluid in motion.
- Sediment** : (1) Particles derived from rocks or biological materials that have been transported by a fluid. (2) Solid material (sludges) suspended in or settled from water.
- Sedimentation** : A broad term that pertains to the five fundamental processes responsible for the formation of sedimentary rocks : (1) weathering, (2) detachment, (3) transportation, (4) deposition (sedimentation), and (5) diagenesis; and to the gravitational setting of suspended particles that are heavier than water.
- Sediment discharge** : The mass or volume of sediment (usually mass) passing a stream transect in a unit of volume. The term may be qualified, for example, as suspended-sediment discharge, bedload discharge, or total-sediment discharge.
- Sediment load** : A general term that refers to material in suspension and/or in transport. It is not synonymous with either discharge or concentration. (See bedload and suspended load).
- Sediment yield** : The total sediment outflow from a drainage basin in a specific period of time. It includes bedload as well as suspended load, and usually is expressed in terms of mass, or volume per unit of time.
- Silt** : See table 7-1.
- Soil** : Unconsolidated mineral and organic surface material that has been sufficiently modified and acted upon by physical, chemical, and biological agents so that it will support plant growth.
- Streambank erosion** : The removal of bank material by the force of flowing water and the caving of streambanks.
- Stream discharge** : The quantity of flow passing a stream transect in a unit of time. (The flow contains both dissolved solids and sediment.)

- Suspended load** : That part of the sediment load which is suspended sediment. (See sediment load.)
- Suspended Sediment** : Sediment that is carried in suspension by the turbulent components of the fluid or by Brownian movement.
- Thalweg (*)** : The locus of the deepest points in a valley at successive cross sections.
- Topset bed** : A layer of sediments deposited on the top surface of an advancing delta which is continuous with the landward alluvial plain.
- Total-sediment discharge** : The total quantity of sediment passing a section in a unit of time.
- Turbulence** : In general terms, irregular motion of a flowing fluid.
- Unmeasured sediment discharge** : The difference between total sediment discharge and measured suspended-sediment discharge.
- Unsampled depth** : The unsampled part of the sampling vertical; usually within 8 to 15 cm of the streambed, depending on the kind of sampler used.
- Watershed (or divide) (*)** : The divide or boundary between two catchment areas (or drainage areas). In American, watershed has the same meaning as drainage basin and it is used in this Bulletin with the American meaning : all lands enclosed by a continuous hydrologic-surface drainage divide and lying upslope from a specified point on a stream (see drainage basin).

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : janvier 1989
N° 14176
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier MAGNA

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

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



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