

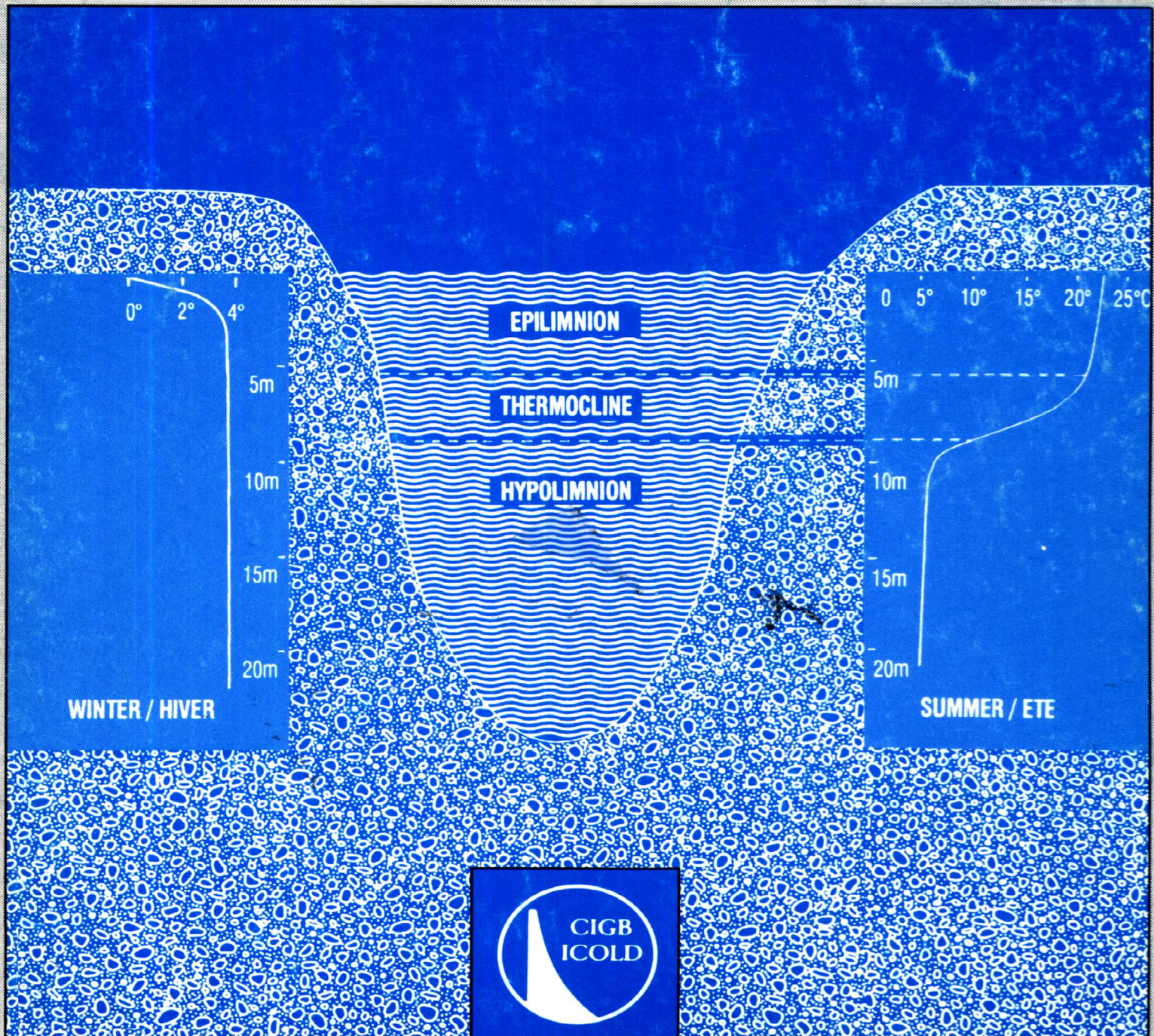
DAMS AND ENVIRONMENT

Water quality and climate

BARRAGES ET ENVIRONNEMENT

Qualité de l'eau et climat

Bulletin 96



1994

The cover illustration is reproduced from Fig. 4 (page 34).
Thermal stratification in a northern temperate reservoir (theoretical diagram).

*L'illustration de couverture reproduit la Fig. 4 du Bulletin (page 34).
Stratification thermique dans une retenue d'une région septentrionale tempérée
(schéma théorique).*

This Bulletin has been prepared by the Sub-Committee on Water Quality
and Climate of the Committee on the Environment.

French translation finalized by Y. Le May.

*Ce Bulletin a été préparé par le Sous-Comité de la Qualité de l'Eau
et du Climat du Comité de l'Environnement.*

Traduction en français mise au point par Y. Le May.

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.

DAMS AND ENVIRONMENT

Water quality and climate

BARRAGES ET ENVIRONNEMENT

Qualité de l'eau et climat

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

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

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

(*) Chairman/Président } Sub-Committee on Water Quality and Climate.

(**) Member/Membre } Sous-Comité de la Qualité de l'Eau et du Climat.

(†) Chairman of Main Committee, 1993 onwards/Président du Comité depuis 1993.

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

(2) Member since 1990/Membre depuis 1990.

(3) Member since 1989/Membre depuis 1989.

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. MODIFICATIONS PHYSIQUES
 3. QUALITÉ DE L'EAU
 4. CHANGEMENTS CLIMATIQUES
 5. RÉFÉRENCES
 6. GLOSSAIRE

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. PHYSICAL CHANGES
 3. WATER QUALITY
 4. CLIMATIC CHANGES
 5. REFERENCES
 6. GLOSSARY

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	8
1. INTRODUCTION	10
1.1. But du rapport et domaine traité	10
1.2. Régions climatiques	10
1.3. Effets potentiels	14
2. MODIFICATIONS PHYSIQUES	18
2.1. Retenues	18
2.1.1. Érosion des rives	18
2.1.2. Sédimentation	22
2.2. En aval des retenues	24
2.2.1. Effets	24
2.2.2. Mesures d'atténuation	24
3. QUALITÉ DE L'EAU	26
3.1. Retenues	26
3.1.1. Propriétés physiques	26
3.1.2. Propriétés chimiques	36
3.2. En aval des retenues	52
3.2.1. Propriétés physiques	52
3.2.2. Propriétés chimiques	54
3.2.3. Estuaire	56
4. CHANGEMENTS CLIMATIQUES	60
4.1. Méthodes d'évaluation	64
4.1.1. Observations	64
4.1.2. Prévision des influences	66
4.2. Influences sur la température	66
4.3. Régime des vents	68
4.4. Régime des glaces	70
4.5. Évaporation et humidité	70
4.6. Précipitations	72
4.7. Brouillard	72
4.8. Conclusion	74
5. RÉFÉRENCES	76
6. GLOSSAIRE	80

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	9
1. INTRODUCTION	11
1.1. Purpose and Scope	11
1.2. Climatic Regions	11
1.3. Potential Effects	15
2. PHYSICAL CHANGES	19
2.1. Impoundments	19
2.1.1. Shoreline Erosion	19
2.1.2. Sedimentation	23
2.2. Downstream of Impoundments	25
2.2.1. Effects	25
2.2.2. Mitigation	25
3. WATER QUALITY	27
3.1. Impoundments	27
3.1.1. Physical Properties	27
3.1.2. Chemical Properties	37
3.2. Downstream of Impoundments	53
3.2.1. Physical Properties	53
3.2.2. Chemical Properties	55
3.2.3. Estuary	57
4. CLIMATIC CHANGES	61
4.1. Evaluation Methods	65
4.1.1. Observations	65
4.1.2. Impact Forecasts	67
4.2. Effect on Temperature	67
4.3. Wind Regime	69
4.4. Ice Regime	71
4.5. Evaporation and humidity	71
4.6. Precipitation	73
4.7. Fog	73
4.8. Conclusion	75
5. REFERENCES	76
6. GLOSSARY	83

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

- Fig. 1. – Répartition des principaux réservoirs selon les régions climatiques.
- Fig. 2. – Effets potentiels d'une retenue sur le milieu physique.
- Fig. 3. – Effets potentiels d'une retenue sur la qualité de l'eau.
- Fig. 4. – Stratification thermique dans une retenue d'une région septentrionale tempérée.
- Fig. 5. – Variation de la densité de l'eau en fonction de la température.
- Fig. 6. – Effets potentiels d'une retenue sur le climat, dans une région septentrionale tempérée.
- Tableau 1. – Rapport entre la superficie inondée et le volume d'eau annuel de certains réservoirs, et changements observés.

LIST OF FIGURES AND TABLE

- Fig. 1. – Distribution of Major Reservoirs by Climatic Region.
- Fig. 2. – Potential Impacts of a Reservoir on the Physical Environment.
- Fig. 3. – Potential Impacts of a Reservoir on Water Quality.
- Fig. 4. – Thermal Stratification in a Northern Temperate Reservoir.
- Fig. 5. – Variation of Water Density with Temperature.
- Fig. 6. – Potential Impacts of a Northern Temperate Reservoir on Climate.
- Table 1. – Ratio of Land Area Flooded to Annual Water Volume at Several Reservoirs, with Changes Observed.

AVANT-PROPOS

Le Comité de l'Environnement de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) a déjà publié sept Bulletins (n^{os} 35, 37, 50, 65, 66, 86 et 90) (*). Le premier est en grande partie technique; le second est destiné à l'information du grand public; le troisième analyse les expériences d'ingénieurs confrontés aux problèmes d'impact des barrages sur l'environnement dans les grandes régions climatiques du monde; le quatrième présente cinq exemples vécus; le cinquième décrit en détail l'expérience acquise aux Pays-Bas sur l'aménagement du Zuiderzee; le sixième traite des effets socio-économiques associés à la construction des grands barrages; le septième est consacré aux effets géophysiques.

Le présent Bulletin donne une synthèse des effets des retenues sur la qualité de l'eau et le climat. Il s'appuie, entre autres, sur des rapports présentés pour la Question 60 au 16^e Congrès des Grands Barrages (San Francisco, 1988) : « Retenues et Environnement – Expérience de gestion et de mesure d'impact », et pour la Question 64 au 17^e Congrès des Grands Barrages (Vienne, 1991) : « Les barrages et l'environnement ». Ces rapports et d'autres documents cités en références donnent des exemples spécifiques de problèmes et de solutions, le présent document ayant un caractère général.

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

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

(*) La liste de ces sept Bulletins figure au chapitre 5, Références.

FOREWORD

The Committee on the Environment of the International Commission on Large Dams (ICOLD) has previously published seven Bulletins (35, 37, 50, 65, 66, 86 and 90) (*). The first was largely of a technical nature, and the second for the better information of the general public; the third distilled the experiences of engineers involved with dam projects located in broadly defined climatic regions of the world; the fourth gave five case histories; the fifth describes in detail the experience with the Zuiderzee project, in the Netherlands; the sixth gives an overview of social and economic problems related to the construction of a large dam; the seventh deals with the geophysical impacts.

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

E. T. Haws
Chairman
Committee on the Environment

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

(*) *The list of these seven Bulletins is given in Chapter 5, References.*

1. INTRODUCTION

1.1. BUT DU RAPPORT ET DOMAINE TRAITÉ

La principale raison de construire un barrage est de stocker de l'eau et de la contrôler. On peut construire des barrages pour différents objectifs, tels que : la maîtrise des crues, l'amélioration de la navigation, la production d'électricité ou la fourniture d'eau domestique, industrielle ou agricole.

La construction d'un barrage et la création d'un grand réservoir ont des effets très importants : un milieu terrestre et fluvial est transformé en un nouveau milieu, aux conditions *lacustres*. Il en résulte un ensemble complexe de répercussions sur les composantes humaines, biologiques, hydrologiques, atmosphériques et terrestres. De plus, ces composantes environnementales sont susceptibles d'être modifiées et perturbées à toutes les étapes de l'aménagement, que ce soit à court ou à long terme, depuis la construction des ouvrages de retenue jusqu'à la mise en eau et même l'exploitation du réservoir. L'impact sera plus ou moins important selon les conditions biophysiques et socio-économiques de la région.

Le présent document est consacré aux principaux impacts des grands réservoirs sur la qualité de l'eau et le climat. Ces effets sont étudiés en fonction des modifications *morphologiques* et hydrologiques causées par la création et l'exploitation d'un réservoir, tant en amont qu'en aval de celui-ci. Des distinctions sont également faites suivant la répartition géographique et climatique des réservoirs, avec des exemples concrets où des impacts ont été observés et étudiés.

Rédigé avant tout pour des profanes, ce document vise à renseigner les promoteurs, les maîtres d'œuvre, les maîtres d'ouvrage, les organismes de financement et le grand public sur les problèmes posés par la création de réservoirs et relatifs au climat et à la qualité de l'eau. Cette information devrait attirer l'attention sur la nécessité d'évaluer en profondeur les impacts sur l'environnement, afin d'identifier les principaux problèmes ainsi que les mesures à prendre pour éviter ou atténuer les impacts négatifs, améliorer l'environnement et promouvoir l'utilisation à buts multiples de la nouvelle retenue.

1.2. RÉGIONS CLIMATIQUES

L'impact d'un réservoir peut varier, être atténué ou amplifié selon l'emplacement géographique et le type de climat. La Fig. 1 montre les grandes régions climatiques du globe et la situation de quelques très grandes retenues (plus de 1 000 km²).

Les régions climatiques froides comprennent les zones polaires et les zones de très haute montagne, ainsi que des zones continentales froides où les températures moyennes les plus élevées ne dépassent pas 16 °C, et où les températures les plus

1. INTRODUCTION

1.1. PURPOSE AND SCOPE

The most common reason for constructing a dam is to store and control water. Dams may be built for many reasons, such as flood control, improvement of navigation, generation of electricity or provision of water for domestic, industrial or agricultural use.

The construction of a dam and the creation of a large reservoir have a very significant effect in that a land and river environment is actually transformed into a new environment with *lacustrine* conditions. Complex series of impacts may be generated on the human, biological, hydrological, atmospheric and land components of the environment. These environmental components are likely to be modified at every stage of a project, in both the short and the long term, from the construction of the impoundment to the flooding of the reservoir, and even as a result of its operation. Impact will also vary depending on the biophysical and socio-economic conditions of the region.

This paper is intended to summarize the principal effects of large reservoirs, particularly on water quality and climate. These aspects are dealt with in terms of the *morphological* and hydrological changes induced by the creation and operation of a reservoir, both in and downstream of impoundments. Distinctions are also made on the basis of the geographic and climatic distribution of large reservoirs, with actual examples of where impacts have been observed and studied.

Prepared mainly for non experts, this report is more directed towards providing promoters, engineers, owners, financing agencies and the general public with an awareness of water quality and climate issues relating to the creation of reservoirs. This awareness will lead to recognition of the need for the preparation of a thorough environmental impact assessment to identify the major issues and proposed measures to avoid or mitigate adverse impacts and to enhance the environment and promote multiple use of the new water body.

1.2. CLIMATIC REGIONS

The effects associated with a reservoir may vary, or be mitigated or magnified, depending on the geographical location of the reservoir and the prevailing climate. Fig. 1 shows the earth's main climatic regions and the distribution of some very large reservoirs (over 1 000 km²).

Cold climatic regions include the polar and very high mountain zones, as well as cold continental sectors, where the warmest mean temperatures are below 10 to 16 °C and the coldest are below – 16 °C. Temperate climates include the full

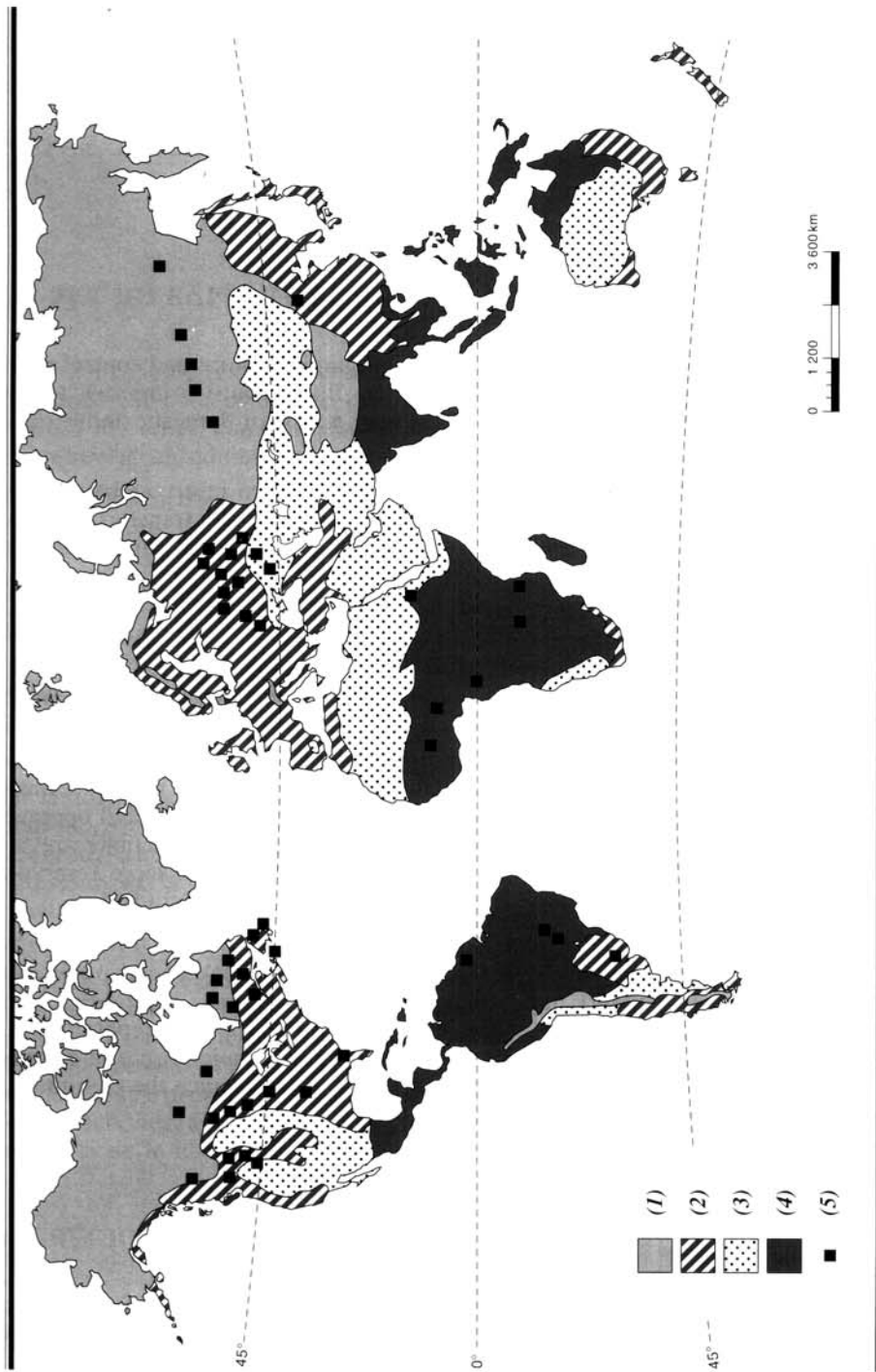


Fig. 1

Distribution of Major Reservoirs by Climatic Regions

Répartition des principaux réservoirs suivant les régions climatiques

- | | |
|--------------------------------------|--|
| (1) Cold climate | (1) Climat froid |
| (2) Temperate climate | (2) Climat tempéré |
| (3) Dry climate | (3) Climat sec |
| (4) Hot climate | (4) Climat chaud |
| (5) Reservoir (approximate location) | (5) Réservoir (localisation approximative) |

basses sont inférieures à -16°C . Les zones tempérées comprennent toute la gamme des climats de type continental : continental à été chaud, océanique, chaud méditerranéen et tempéré chaud de type chinois; les températures moyennes varient entre moins de $0-10^{\circ}\text{C}$ et plus de $20-25^{\circ}\text{C}$. Les climats secs incluent à la fois des régions sèches (à tendance méditerranéenne ou continentale) et des régions désertiques (à hiver froid et été chaud, désertique chaud et désertique frais, et de type Namib); les températures moyennes se situent généralement entre $0-5^{\circ}\text{C}$ et plus de 20°C . Il est à noter que les précipitations sont si faibles dans ces régions que l'agriculture nécessite l'irrigation des terres. Enfin, dans les climats chauds, on trouve les régions tropicales (pluvieuses ou peu pluvieuses), équatoriales et tropicales-équatoriales d'altitude, où les températures les plus élevées dépassent 25°C , alors que les températures les plus basses se maintiennent généralement au-dessus de $15-18^{\circ}\text{C}$.

Les effets sur la qualité de l'eau et sur le climat varient largement selon l'emplacement géographique du réservoir et le climat qui prévaut à cet endroit. Ils dépendent également de l'exploitation du barrage, du niveau d'industrialisation et de développement agricole dans le bassin versant. C'est pourquoi il faut être prudent au moment d'appliquer des principes généraux à un site spécifique.

1.3. EFFETS POTENTIELS

Il est important de rappeler que la précision des prévisions est directement liée à la fiabilité des connaissances de base du milieu physique, biologique et humain, ainsi qu'aux conditions hydrologiques et hydrodynamiques de l'endroit où se trouve un barrage (Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB, 1981, et 17^e Congrès de la CIGB, 1991).

À ce sujet, l'Association Canadienne de l'Électricité a mené une étude en 1986, afin d'établir dans quelle mesure les effets environnementaux prévus lors de l'évaluation des impacts de 11 aménagements hydroélectriques canadiens se sont confirmés a posteriori. Il ressort que sur 2 073 prévisions, seulement 29 % ont pu être vérifiées, ce qui signifie que 71 % d'entre elles ne se sont pas concrétisées ou n'étaient pas vérifiables.

Il convient donc tout d'abord de ne retenir, aux fins d'évaluation d'un projet, que les paramètres les plus importants et les plus significatifs, et de constituer un échantillonnage adéquat (intensité, choix des stations, etc.), de façon à bien définir les corrélations et à faire des prévisions comportant le moins d'erreurs possible.

Ces prévisions devraient être formulées sous forme d'hypothèses vérifiables ultérieurement. Aussi, les travaux de suivi après les travaux d'aménagement devraient-ils être étroitement liés aux évaluations d'impact sur l'environnement; du fait qu'ils sont souvent dissociés, le déroulement des essais est parfois inadéquat, et on note des lacunes dans l'énoncé des prévisions. Après avoir identifié les effets spécifiques, on peut fournir des réponses appropriées, applicables à l'ensemble des activités. L'intégration des études environnementales au programme des travaux est la façon la plus efficace de prévoir les besoins en matière d'environnement et d'y répondre. Par exemple, c'est ce qui a permis d'éviter les impacts possibles sur la pêche à la truite de lac, à l'aménagement de transfert d'énergie par pompage de Mt. Elbert (16^e Congrès de la CIGB, 1988).

range of continental-type, hot summer continental, oceanic, warm Mediterranean and Chinese-type warm temperate climates; mean temperatures vary from less than 0 to 10 °C to more than 20 to 25 °C. Dry climates include both dry sectors (with Mediterranean or continental tendencies) and desert sectors (with cold winters and hot summers, hot desert and cool desert, and Namib type): mean temperatures generally hover between 0 to 5 °C and more than 20 °C. In such regions, precipitation is so low that irrigation is required for agriculture. Finally, among hot climates there are tropical (rainy or not very rainy), equatorial and high tropical-equatorial regions, where the highest temperatures exceed 25 °C, while the coolest temperatures generally remain above 15 to 18 °C.

The water quality and climatic effects of a dam will vary widely depending upon its geographical location and the specific climate at that location. They also depend on dam operations and the level of industrialisation and agricultural development in the catchment area. Therefore, care must be taken in applying general considerations to a specific site.

1.3. POTENTIAL EFFECTS

It is important to remember that the accuracy of forecasts is directly linked to the reliability of basic knowledge of the physical, biological, and human environment, and the hydrological and hydrodynamic conditions at a particular dam site (ICOLD 1981, ICOLD 1991 17th Congress).

In this regard, the Canadian Electrical Association (1986) has conducted an exercise to determine to what extent environmental impacts forecast in assessments of the effects of 11 Canadian hydroelectric developments were confirmed by experience subsequent to the developments. It was found that for those projects more than 2 073 forecasts of individual environment impacts were made, of which some 30 % only were verifiable by later observation meaning that maybe 70 % of them did not occur or were not measurable.

It is therefore appropriate at the outset to select the most important, relevant parameters to be assessed within the framework of a project, with an adequate sampling (intensity, selection of stations, etc.) so as to define clearly the inter-relationships and to issue forecasts with the least possible error.

These forecasts should be expressed as hypotheses that may be subsequently verified. Thus, post-development follow-up work should be closely associated with the environmental impact assessments; the fact that they are not often linked accounts for the sometimes poor quality of the experimental procedures, and for the shortcomings observed in the formulation and statement of forecasts. After the specific effects have been identified, appropriate responses in the general operation can be made. Integrating the environmental studies with the planning work is the most effective approach for planning and engineering responses to the environmental needs. For example, potential impacts on a lake trout fishery, in the Mt. Elbert Pumped Storage Plant were avoided (ICOLD 1988 16th Congress).

Le programme de suivi environnemental doit servir, d'une part, à vérifier l'existence et l'importance de l'impact et, d'autre part, à contrôler que les mesures d'atténuation mises en œuvre sont appropriées et efficaces.

À cet égard, une autre étude de l'Association Canadienne de l'Électricité, réalisée en 1984, a permis de réunir de la documentation sur les moyens de réduire les effets des aménagements hydroélectriques canadiens sur les ressources biologiques. On a identifié au total 53 mesures pouvant s'appliquer au Canada, et on sait que 33 d'entre elles ont déjà été utilisées pour atténuer les impacts des aménagements hydroélectriques sur l'environnement. Alors que les efforts en vue d'atténuer les impacts s'intensifient à mesure que de nouveaux projets hydroélectriques sont approuvés, une enquête menée auprès des services publics canadiens indique toutefois qu'une surveillance suivie fait encore défaut. Il est donc important de recueillir et de conserver plus d'informations afin de pouvoir documenter quantitativement toutes les étapes de mise en œuvre des mesures d'atténuation, de la planification initiale à la réalisation, et de pouvoir en mesurer l'efficacité.

On connaît assez bien les paramètres importants à étudier pour évaluer la qualité de l'eau, car ces derniers sont à l'origine des modifications potentielles en amont et en aval des ouvrages de retenue. Aussi, peut-on prévoir une méthode d'échantillonnage et de suivi environnemental afin de bien cerner les effets anticipés.

Cependant, il en va tout autrement de l'aspect climatique associé à la création d'une grande retenue. Même s'il ne fait aucun doute que les retenues peuvent produire des variations climatiques, la possibilité de définir et de vérifier les prévisions de changement est sujette à caution : d'une part, les observations faites sur le terrain montrent que les variations climatiques, causées par un aménagement, sont vraisemblablement limitées au microclimat, parfois au *mésoclimat*, et qu'elles ont une faible portée écologique, sauf pour ce qui est des grandes retenues ou des climats arides; d'autre part, il est difficile, en principe, de distinguer les variations normales de celles qui sont causées par un aménagement, en raison de la grande variabilité naturelle des facteurs climatiques. Ces deux faits sont sans doute à l'origine du peu d'efforts consacrés aux prévisions climatiques, tel qu'il ressort de l'examen des dossiers d'impact sur l'environnement des aménagements hydroélectriques. Toutefois, il est possible de remédier à la situation en planifiant rigoureusement l'installation de stations climatiques avant la création du réservoir et en comparant les résultats aux enregistrements à long terme de stations voisines (Fitzharris, 1979).

The environmental follow-up programme must serve, on the one hand, to verify the occurrence and scope of the impact and, on the other hand, to measure the relevance and effectiveness of the mitigation measures implemented.

In this regard, the Canadian Electrical Association (1984) conducted another study to establish reference material on means of reducing the impact on biological resources for application to Canadian hydroelectric installations. A total of 53 measures were identified as being applicable to Canada, and 33 of them are known to have been used in that country to reduce environmental impacts caused by hydroelectric projects. While efforts to reduce impacts seem to be growing as new hydroelectric projects are approved, a survey of Canadian utilities shows that consistent monitoring is still desirable. It is therefore important to gather and maintain more information in order to be able to document in quantitative terms all the stages of the mitigation process, from initial planning to implementation, and to be able to monitor its effectiveness.

The important parameters to be studied on water quality are relatively well known as affecting potential changes above and below impoundment works. So the establishment of a sampling and environmental follow-up procedure can be planned with a view to clearly measuring the anticipated effects.

The same does not, however, apply to the climatic aspect associated with the creation of a large reservoir. Although there is no doubt that impoundments can affect climatic variables, the possibility of defining and verifying change forecasts is subject to caution : on the one hand, on-site observations show that the climatic fluctuations induced by a development are likely to be limited to the micro and sometimes *mesoclimatic* scale and so be of a rather small ecological scope, except in the case of large impoundments or in arid climates; on the other hand, it is difficult in principle to distinguish normal fluctuations from those induced by the development, owing to the great natural variability of climatic factors. These two facts no doubt explain why little effort has so far been devoted to climatic forecasts, as can be seen from a review of files on the environmental impact of hydroelectric developments. However, it is possible to do this with careful planning of climate stations before reservoir formation and by relating the results to long-term records of nearby base climate stations (see Fitzharris, 1979).

2. MODIFICATIONS PHYSIQUES

2.1. RETENUES

Les changements observés dans la qualité de l'eau et le climat par suite de la création d'une retenue sont dus aux modifications physiques apportées par la présence et l'exploitation du réservoir (Fig. 2).

En règle générale, la construction d'un ouvrage de retenue entraîne la surélévation du niveau de l'eau en amont, ce qui modifie la morphologie des tronçons proches du réservoir, ainsi que le processus d'érosion et de sédimentation. Une telle réalisation entraîne également l'abaissement du niveau de l'eau en aval durant les périodes de stockage des eaux, ce qui conduit à des effets similaires.

2.1.1. Érosion des rives

a) Effets

Après la mise en eau d'un réservoir, il se produit parfois une érosion des nouvelles rives, ainsi que des glissements de terrain sur les berges constituées de matériaux fins. En augmentant la surface d'un réservoir, l'érosion des berges peut améliorer la réserve utile; c'est ce qu'on a constaté en Saskatchewan (Canada), où la réserve utile du lac Diefenbaker a augmenté de 7,4 % à cause de l'érosion des rives et du transport de sédiments vers les eaux profondes de la tranche morte. La création et l'exploitation d'un grand plan d'eau, de même que la réduction de l'écoulement, augmentent également l'action du vent et des vagues sur les nouvelles rives.

b) Mesures d'atténuation

On peut prendre certaines mesures pour limiter l'érosion des berges d'un réservoir. Mentionnons à ce sujet :

1) la vitesse de remplissage et de vidange de la retenue : celle-ci ne doit pas dépasser la vitesse de variation de la nappe phréatique dans le substratum;

2) le choix des niveaux d'exploitation de la retenue présentant le moins de répercussions, en fonction du substratum;

3) la gestion appropriée du niveau et du débit;

4) l'utilisation d'une végétation résistant aux mouvements de remplissage et de vidange.

Le contrôle de l'utilisation des rives, le zonage de celles-ci, ainsi que la protection de certaines zones sensibles des berges à l'aide de *riprap* constituent d'autres mesures d'atténuation applicables.

2. PHYSICAL CHANGES

2.1. IMPOUNDMENTS

The changes observed in water quality and climate following the creation of an impoundment stem from the physical changes induced by the reservoir, owing both to its presence and to its operation (Fig. 2).

The construction of an impoundment involves raising the water level upstream, and this changes the morphology of the reaches approaching the reservoir as well as their erosion and sedimentation process. It also involves lowering the water level downstream during periods of water storage with similar effects.

2.1.1. Shoreline Erosion

a) Effects

Erosion of the new shoreline and unstable slopes are sometimes observed phenomena on the fine-grained banks of a reservoir following flooding. Bank erosion can, however, by increasing a reservoir's surface area, enhance its useful storage capacity, as was seen at Lake Diefenbaker in Saskatchewan (Canada), where the useful storage capacity increased by 7.4 % due to shoreline erosion and the transportation of sediment to deep water in the dead storage zone. The disadvantages of the loss of bank stability and possible detrimental effects to water quality usually outweigh any such advantage. The creation and operation of a major body of water and the reduction of flow also increase the influence of wind and wave action on the new banks.

b) Mitigation

Certain steps may be taken to limit erosion of reservoir banks. Cases in point are :

- 1) the rate with which the impoundment is flooded, and drawdown which should not exceed the rate with which the water level changes by seepage in the affected substrate. Similar control should also apply to variations in operational reservoir level;
- 2) the selection of reservoir operation levels with lesser impact depending on the substrate;
- 3) and appropriate management of levels and flow;
- 4) the use of vegetation resistant to the prevailing filling and drawdown regime.

Control of shore use, shore zoning, and protection of certain sensitive shoreline sectors by *riprap* are other applicable mitigation measures.

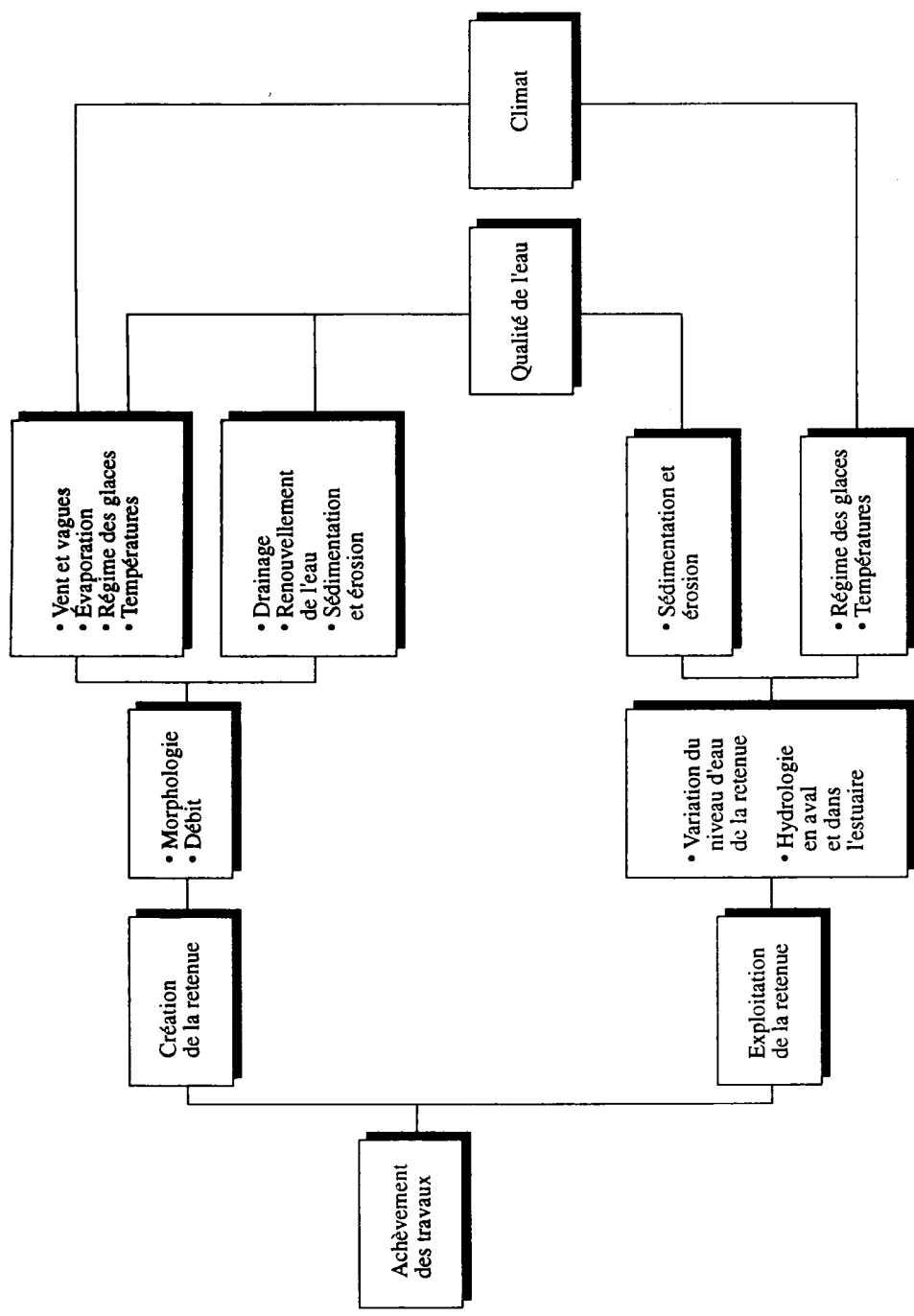


Fig. 2
Effets potentiels d'une retenue sur le milieu physique

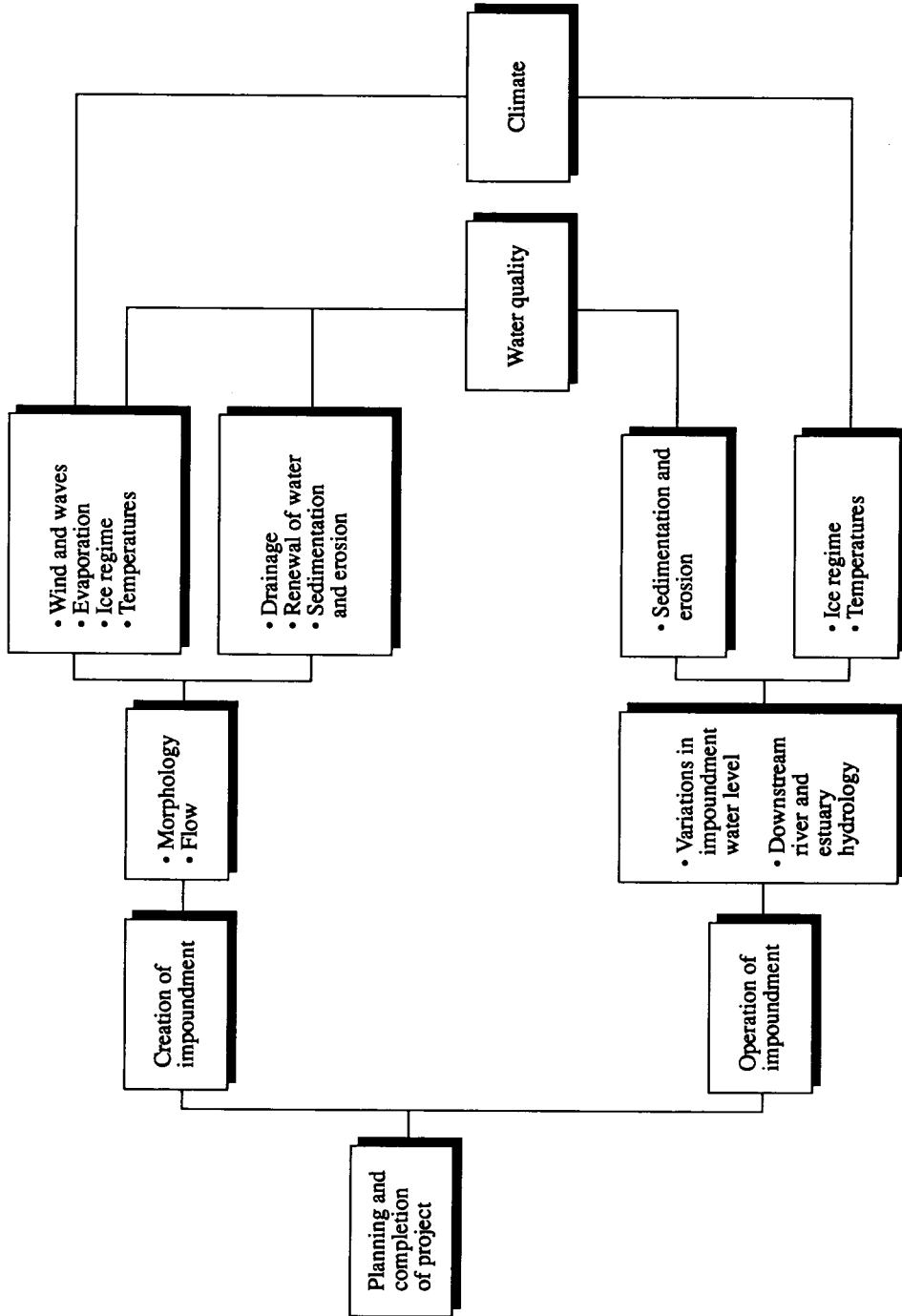


Fig. 2
Potential Impacts of a Reservoir on the Physical Environment

2.1.2. Sédimentation

a) Effets

La création d'un nouveau réservoir augmente souvent l'utilisation des terres et des cours d'eau de son bassin hydrographique pour l'exploitation forestière, l'agriculture, le développement urbain et la villégiature. Une section d'écoulement plus large et la modulation du débit causée par les ouvrages de contrôle tendent à réduire la vitesse du courant; la retenue agit ainsi comme une trappe à sédiments. De plus, le déboisement et le drainage accru des zones riveraines en amont peuvent augmenter la quantité de sédiments, qui se déposent dans le réservoir.

À la limite, l'accumulation de sédiments peut réduire la capacité de stockage d'un réservoir. À titre d'exemple, on a noté aux États-Unis, après 20 ans d'exploitation, une diminution de la capacité de stockage de certains réservoirs d'environ 54 % dans le cas de retenues de capacité inférieure à $0,14 \times 10^6 \text{ m}^3$, et de 3 % dans les réservoirs de $1\,400 \times 10^6 \text{ m}^3$. Par contre, plusieurs années d'observations ont permis de constater que la durée de vie utile du réservoir de Mangla (Pakistan) sera deux fois plus longue que prévu à l'origine.

Dans les cas extrêmes, une perte brusque de capacité de stockage peut causer d'importantes inondations, comme ce fut le cas après un glissement de terrain de $250 \times 10^6 \text{ m}^3$, qui a comblé partiellement la retenue de Vaiont dans la vallée de la Piave (Italie), dont la capacité de stockage n'était que de $168 \times 10^6 \text{ m}^3$. De tels événements sont toutefois exceptionnels et ne sont pas liés aux processus normaux de sédimentation. On peut s'en prémunir par des études sur la stabilité des pentes et des mesures de protection, comme on l'a fait à Clyde, en Nouvelle-Zélande (CIGB 1993 : Bulletin 90).

b) Mesures d'atténuation

Il est possible de limiter la sédimentation des réservoirs à l'aide des mesures suivantes :

- la gestion des bassins hydrographiques, à titre de mesure préventive;
- la mise en place de barrages de rétention des transports solides;
- la dérivation des sédiments;
- le curage à l'eau;
- la chasse d'eau;
- l'utilisation des courants de densité du réservoir;
- le dragage.

Il est nécessaire d'étudier soigneusement l'emplacement du projet, la conception du barrage et les répercussions en aval, avant de choisir la méthode qui convient le mieux à un barrage en particulier (Mahmood, 1987).

2.1.2. Sedimentation

a) Effects

The creation of a new reservoir often increases the use of the land and rivers in its watershed, such as for forestry, farming, urban development and resort use. The impoundment tends to reduce current velocity because of its wider flow section and thus acts as a trap for sediment. Clearing and increased drainage of the upstream environment may provide additional inflow of sediment, which is deposited in the reservoir.

Ultimately, the accumulation of sediments may reduce the reservoir's storage capacity. In the United States such a decrease was seen in the storage capacity of certain reservoirs after 20 years of operation, amounting to approximately 54 % in the cases of impoundments of less than $0.14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, and 3 % for reservoirs of $1\,400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. On the other hand, the useful life of Mangla reservoir (Pakistan) has been shown by 26 years of observation to be twice the original prediction.

In extreme cases, a catastrophic sudden loss of this capacity may lead to major flooding, as was the case with a landslide of $250 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ which partially filled the Vaiont impoundment, in the Piave valley (Italy), with a storage capacity of only $168 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Such events are however exceptionally rare and unrelated to normal sedimentation processes. They must be guarded against by slope stability studies and remedial measures as at Clyde, New Zealand, (ICOLD 1993 : Bulletin 90).

b) Mitigation

Several different approaches can be taken to mitigate reservoir sedimentation. These include :

- watershed management as a preventive means;
- debris dams;
- sediment bypassing;
- sediment flushing;
- sediment sluicing;
- utilization of reservoir density currents;
- sediment dredging;

A careful analysis of the project situation, dam design and downstream consequences is necessary to select the best method for a particular dam site (Mahmood, 1987).

2.2. EN AVAL DES RETENUES

2.2.1. Effets

La rétention des sédiments dans les réservoirs et la modification de l'écoulement ont aussi des effets considérables sur le cours aval de la rivière, jusqu'à son embouchure ou estuaire. Ainsi, on observe souvent, sur plusieurs kilomètres en aval du barrage, une érosion accrue et un surcreusement du lit de la rivière et de ses affluents, l'érosion naturelle n'étant plus compensée par l'apport de sédiments. Selon la valeur fertilisante des sédiments déposés en période de crue, un apport réduit peut priver les terres agricoles en aval d'éléments nutritifs qu'il faut remplacer par des engrais (par exemple, le Nil et son estuaire en aval du barrage d'Assouan, en Égypte, CIGB 1993).

L'exploitation d'une retenue hydroélectrique peut entraîner des variations importantes et rapides du débit à court terme, sur une base journalière et saisonnière, suivant la demande. En plus de la modification de la morphologie du cours d'eau, de telles variations peuvent également être préjudiciables à certains organismes aquatiques, tels que les poissons, qui peuvent se trouver piégés dans des fosses après une coupure radicale du débit. Ces variations peuvent aussi nuire grandement aux activités de loisirs en limitant l'accès aux îles en aval ou en rendant dangereux le nautisme, la baignade ou la pêche. Un tel type de gestion conduit souvent à des conflits avec les riverains, comme c'est le cas dans la région de Montréal, au Québec (Canada), où le niveau du Saint-Laurent entre les lacs Saint-François et Saint-Louis est étroitement lié à l'exploitation de la centrale de Beauharnois.

2.2.2. Mesures d'atténuation

On peut parfois atténuer les variations du débit en construisant une retenue et une centrale hydroélectrique de base en aval, pour servir de régulateur, comme on l'a fait à Pitlochry (Écosse) et à Dartmouth (Australie).

Lorsque des cours d'eau parallèles ont des bassins hydrographiques relativement petits (par exemple, au Canada, en Norvège, en Suède et en Nouvelle-Zélande), on peut en dériver certains. De telles mesures peuvent entraîner une diminution radicale du débit du cours d'eau dérivé, surtout immédiatement à l'aval du point de dérivation où aucun affluent n'alimente l'ancien lit. Cet impact est atténué par une lâchure minimale aux déversoirs et des mesures d'amélioration du *biotope*.

Pour obtenir une description détaillée des modifications physiques liées à la création de retenues, les lecteurs sont invités à consulter le Bulletin sur les effets géophysiques, de même que les Bulletins du Comité de l'Alluvionnement de la CIGB.

2.2. DOWNSTREAM OF IMPOUNDMENTS

2.2.1. Effects

The retention of sediment in reservoirs and the modification of flow have considerable effects on the downstream path of the river reaching as far as its mouth or estuary. Thus, because of the sediment retention upstream, increased erosion is often observed, as well as degradation of the channels of the river and its tributaries for considerable distance below the dam, as natural erosion is no longer offset by added sediment. Depending on the fertilizing value of this sediment deposited at times of high flow, its decrease deprives downstream farmland of additional nutrients which must be compensated for by fertilizer (for instance, the Nile and its estuary below the Aswan Dam in Egypt, ICOLD 1993).

Operation of a reservoir for hydroelectric generation can entail major, rapid fluctuations in short-term flow, on a diurnal and seasonal basis according to demand. In addition to altering the morphology of the river, such fluctuations may be detrimental to aquatic organisms, such as fish, which may be trapped in pools after a drastic cut in flow. These fluctuations may also seriously restrict recreational activities by impeding access to downstream islands, or by making it dangerous for boating, swimming or angling. This type of management often leads to conflicts with shoreline users, for instance in the Montréal region (Québec, Canada), where the level of the St. Lawrence River between Lakes St. François and St. Louis is closely linked to the operation of the Beauharnois hydroelectric plant.

2.2.2. Mitigation

Fluctuations in downstream flows are sometimes mitigated by the building of a downstream base load reservoir and power station to act as a regulator as at Pitlochry in Scotland and Dartmouth in Australia.

In situations with (many) parallel rivers with relatively small watersheds (as for example in Canada, Norway, Sweden, Scotland and New Zealand), river diversion have been made in some cases. Projects like this can lead to a drastic reduction in water discharge in the diverted river, especially immediately downstream of the point of diversion, where no tributaries add water to the old river bed. This impact is mitigated by minimum released flow at weirs and *biotope* improving measures.

For a more detailed description of the physical changes that can accompany the creation of reservoirs, the reader is directed to the Bulletin on geophysical impacts and the Bulletins prepared by the Sedimentation Committee of ICOLD.

3. QUALITÉ DE L'EAU

Chaque étape de la réalisation d'une retenue a des répercussions sur la qualité de l'eau (Fig. 3). La mise en eau de la retenue déclenche le lessivage des sols submergés et la décomposition des résidus organiques, processus qui à leur tour agissent sur les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau. En outre, le mode d'exploitation des grands réservoirs entraîne une modification de la *stratification thermique*, ainsi qu'une nouvelle répartition de l'*oxygène dissous* qui modifie également les caractéristiques chimiques de l'eau et des sédiments.

Dans des cas extrêmes, la présence et l'exploitation d'une retenue peuvent accélérer le vieillissement de la masse d'eau et son *eutrophisation*, et faire en sorte que l'on doive l'utiliser différemment.

Il existe un certain nombre de modèles permettant de prédire les impacts des projets futurs sur la qualité de l'eau. Après 15 ans de surveillance au complexe La Grande (Baie James, Canada) et une série de données sans précédent, les experts recommandent de tenir compte des critères suivants : la qualité initiale de l'eau, le *pouvoir tampon*, la superficie des terres inondées, la matière organique décomposable par mètre carré de terre inondée, le volume de retenue, le *temps de séjour* de l'eau et, dans certaines régions, le temps de séjour de la couche de glace. Il faut généralement ajouter à ces critères le régime d'exploitation, l'utilisation du bassin versant, le développement agricole, le reboisement et l'industrialisation.

3.1. RETENUES

3.1.1. Propriétés physiques

Le principal changement enregistré à la suite de la création d'un barrage est la transformation d'un régime fluvial (caractérisé par une grande vitesse d'écoulement, un brassage et une turbulence importants, la présence de transport solide par suspension et de transport solide de fond, un taux élevé de *réaération*) en un régime *lacustre* (caractérisé par une vitesse d'écoulement réduite, peu de brassage et de turbulence, un alluvionnement, moins d'aération, une stratification thermique, un temps de séjour plus long, l'action du vent et des vagues, l'érosion des rives).

a) Turbidité

Effets

Prenons le cas d'un réservoir dont la surface de submersion est grande et contient beaucoup de matières susceptibles de causer une turbidité. L'opération de remplissage par submersion du sol peut mettre en suspension une certaine quantité de particules qui pourront altérer temporairement la clarté et la couleur de l'eau et, dans des conditions extrêmes, contribuer à en augmenter la température, à cause d'une plus grande absorption du rayonnement solaire. Il est donc important de bien définir la vitesse de remplissage d'une retenue.

3. WATER QUALITY

A reservoir induces effects on water quality at each stage of its development (Fig. 3). The flooding of the impoundment triggers possible leaching of the flooded soil and decomposition of organic residues, with subsequent effects on the physical and chemical properties of the water. In addition, the method of operation of major reservoirs entails a change in *thermal stratification* and distribution of *dissolved oxygen* which also acts on the chemical properties of water and sediment.

In extreme cases, the presence and operation of an impoundment may accelerate the ageing of the water body and its *eutrophication* to the extent of affecting its different uses.

Many models are available to predict the impacts of future projects on water quality. After fifteen years of monitoring at La Grande project (James Bay, Canada) and a probably unique series of data, experts recommend taking into account the following criteria: the initial water quality, the *buffering capacity*, the area of land flooded, the decomposable organic material per square meter of flooded land, the reservoir volume, the *residence time* of the water and in some regions the duration of ice cover. To these criteria in the general case, there should be added the criteria of operating regime, catchment use, agricultural development, afforestation, and industrialisation.

3.1. IMPOUNDMENTS

3.1.1. Physical Properties

The major change related to damming is the transformation of a river regime (characterized by significant velocity, mixing and turbulence of water, suspended load and bedload and high *reaeration* rate) into a *lacustrine* regime (characterized by slow velocity, low mixing and turbulence, sedimentation, less aeration, thermal stratification, longer residence time, wind and wave action and shore erosion).

a) Turbidity

Effects

Take the case of a reservoir whose impoundment area is large and contains much material capable of causing turbidity: the operation of filling up the reservoir by flooding soil may bring into suspension a number of particles which can temporarily alter the clarity and colour of the water and, in extreme conditions, through increased absorption of solar radiation, contribute to raising its temperature. Thus the rate of filling must be well planned.

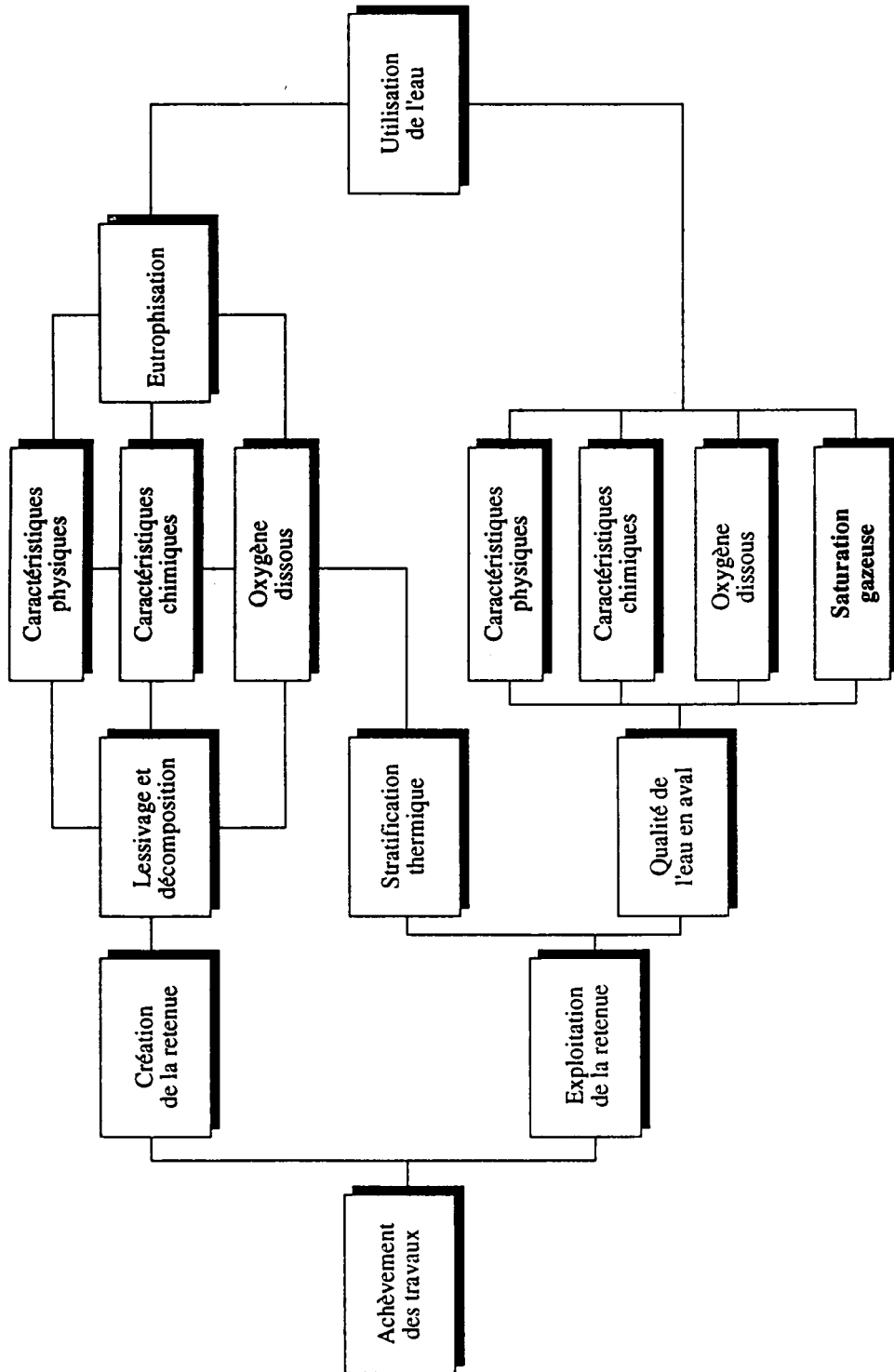


Fig. 3

Effets potentiels d'une retenue sur la qualité de l'eau

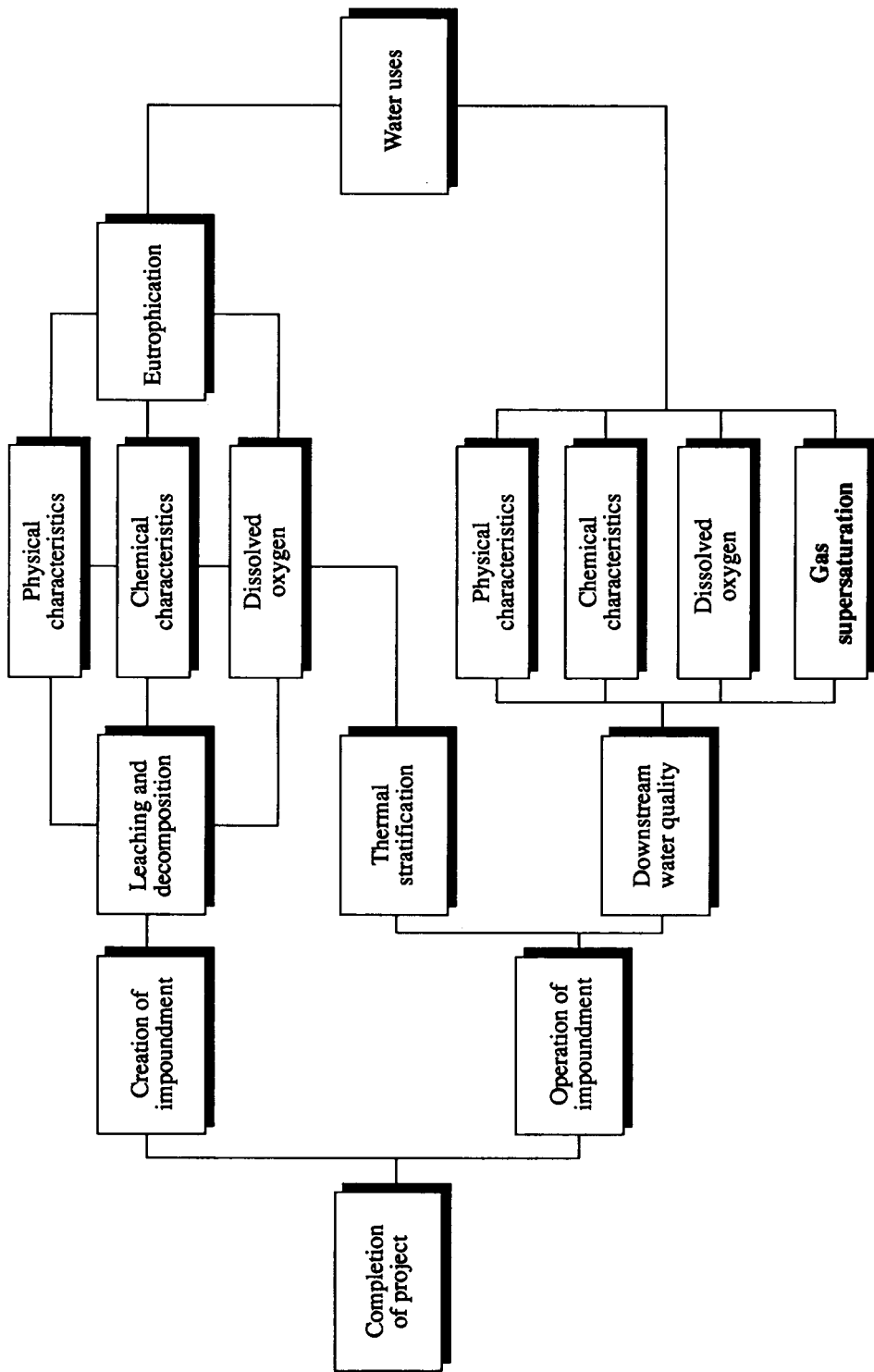


Fig. 3
Potential Impacts of a Reservoir on the Water Quality

Les nouvelles conditions créées dans la retenue, combinées avec une augmentation de la productivité primaire, modifient souvent la composition des espèces de poisson, comme c'est le cas dans les réservoirs situés dans les régions septentrionales tempérées (Baie James, réservoirs des rivières Manicouagan et Outardes, Québec, Canada), en favorisant des espèces telles que le grand brochet (*Esox lucius*) au détriment d'espèces halieutiques plus sensibles comme les salmonidés.

Une forte augmentation de la *turbidité* et la présence de sédiments en suspension durant une certaine période peuvent obstruer les branchies des poissons et causer leur mort. De plus, le dépôt de sédiments peut recouvrir et faire suffoquer les *invertébrés benthiques*, les œufs et les alevins de poissons peu tolérants, et augmenter le parasitisme et les infections.

Par contre, la nouvelle morphologie, la modulation du débit et la réduction de la vitesse du courant favorisent le dépôt de sédiments, ce qui a pour effet de diminuer la teneur en sédiments et d'améliorer la transparence de l'eau. Une plus grande clarté de l'eau peut favoriser la productivité primaire et contribuer à augmenter les stocks piscicoles. Le dépôt de sédiments dans le réservoir peut aussi avoir un autre effet positif : la formation, par sédimentation, d'un nouveau delta à la tête du réservoir attirera la faune et en assurera le développement.

Par ailleurs, en milieu habité, la diminution du brassage des eaux, l'augmentation du temps de séjour et les rejets municipaux, industriels et agricoles constituent autant de facteurs susceptibles d'augmenter la turbidité.

Il faut noter que l'exploitation d'une retenue a un effet permanent sur le brassage des eaux, ainsi que sur les processus de sédimentation et de transport des sédiments qui, du point de vue quantitatif, sont des effets à long terme. Du point de vue qualitatif, des changements sont possibles, compte tenu de la gestion des eaux fluviales et des canaux.

Mesures d'atténuation

Pour réduire au minimum l'augmentation de la turbidité durant le remplissage initial, il faut, lorsque c'est possible, bien déterminer la vitesse de remplissage. L'aménagement du territoire, notamment la plantation de végétaux, des travaux de conservation du sol et de meilleures pratiques de gestion des bassins versants, dont ceux destinés à l'agriculture, permettront de réduire l'apport de particules en suspension.

b) Stratification thermique

Effets

En général, les retenues de plus de dix mètres de profondeur, où l'eau *séjourne longtemps* (cycle saisonnier complet), présentent des couches de température différente. L'exploitation et la morphologie du réservoir auront un effet important sur la stratification thermique.

La stratification thermique est le résultat, généralement temporaire, d'un processus physique dynamique, où deux (ou plus) forces contraires agissent :

- le réchauffement de la surface de l'eau par rayonnement diminue le brassage vertical (poussée d'Archimède);

The new conditions created in the impoundment, combined with an increase in primary productivity, often alter the composition of fish species, as seen especially in temperate, northern reservoirs (James Bay, reservoirs on the Manicouagan and Outardes Rivers, Québec, Canada), where species like the northern pike (*Esox lucius*) are favoured to the detriment of more sensitive fish species like the salmonids.

A large increase in *turbidity* and suspended sediment in some reservoirs over time can clog the gills of fish and entail their death. The subsequent deposition of this sediment can cover and suffocate *invertebrate benthos*, eggs and low-tolerance small fry, as well as increasing the incidence of parasites and infections.

On the other hand, the new morphology, the modulation of flow and the reduction in current velocity may lead to the deposition of sediment, and this contributes to lowering its content in the water and thus increasing transparency. This greater clarity in the water can also be favourable to primary productivity and fish stocks. Sediment deposition in the reservoir could also have an additional positive effect as a new delta formed by sedimentation at the head of the reservoir will attract and promote wildlife.

In addition, in inhabited areas, the increase in residence time and municipal, industrial and agricultural disposals are all factors likely to result in increased turbidity.

Note that the operation of a reservoir has a permanent impact on the process of sedimentation and transportation of sediment, and that quantitative effects are long term. In quality, changes are possible, depending on the management of river water and channels.

Mitigation

To minimize increased turbidity during initial filling, the rate of filling must be well planned wherever practicable. Land use planning including plantation, soil-conservation works and best catchment management practices including those for agriculture will reduce inflow of suspended substances.

b) Thermal Stratification

Effects

In general reservoirs with long water *residence time* (full seasons cycle) and water depth of more than 10 meters will frequently have thermal stratification. Reservoir operation and morphology will have an important influence on stratification.

Thermal stratification is the result, generally temporary, of a dynamic physical process, where two (or more) forces are counteracting :

- warming up at the water surface by radiation (buoyancy) reduces vertical mixing;

- le brassage vertical est déclenché à la surface de l'eau par les forces du vent et des vagues (entraînement).

Dans les cas où les forces de réchauffement excèdent les forces de brassage vertical (par temps chaud et calme), la stratification thermique se fait d'elle-même. Finalement, dans certains cas, l'hypolimnion froid disparaît même près du fond du réservoir. Lorsque le temps est froid et/ou orageux, il se produit un phénomène d'entraînement entre l'*hypolimnion* froid et l'*épilimnion* (Fig. 4).

On peut aussi produire une stratification hydrauliquement en évacuant de l'eau à partir d'une vanne située à mi-hauteur d'un barrage, comme cela a été constaté dans des réservoirs des États de Sao Paulo et de Minas Gerais (Furnas, Brésil), ainsi qu'en Espagne.

L'apport d'eau d'un écoulement fluvial turbulent peut provoquer un brassage supplémentaire, mais l'entrée d'eau d'une rivière ayant une température différente de celle de l'*épilimnion* peut favoriser la stratification.

En général, la stratification est causée par des différences de densité, elles-mêmes provoquées par des différences dans la température, la salinité, les charges solides, la turbidité et les autres paramètres qui déterminent la qualité de l'eau.

Bien que ce modèle soit applicable à tous les réservoirs profonds, quel que soit leur emplacement géographique, il apparaît que les réservoirs des régions tropicales conservent leur stratification thermique plus longtemps que ceux situés dans les régions septentrionales tempérées. Par exemple, dans le réservoir Brokopondo (Surinam), la stratification empêche pratiquement le brassage de l'eau par le vent et l'inversion de masse, laissant l'oxygène dissous en surface dans les eaux plus chaudes. En effet, en milieu tropical où les températures sont très élevées, la stratification thermique est plus intense et produit une barrière thermique beaucoup plus stable que dans les milieux plus froids, en raison du gradient de densité de l'eau (Fig. 5). Il faudra des forces cinq fois plus grandes pour surmonter un écart de température de 5 °C, à 30 °C, que pour surmonter le même gradient de température à 10 °C.

Les réservoirs de l'Amazonie se stratifient pour de plus longues périodes et sont dits *monomictiques* chauds (une seule période de circulation). Il peut s'y produire une anoxie de l'hypolimnion.

À mesure que la décomposition de la matière organique contribue à diminuer la teneur en oxygène dissous dans les couches d'eau profondes, le brassage de l'eau, consécutif à un changement saisonnier de température, peut s'avérer positif pour les poissons puisque la quantité d'oxygène dissous augmente sur toute la hauteur de la tranche d'eau. Toutefois, il est possible que le brassage de l'eau augmente la turbidité et la quantité de sédiments en suspension.

La stratification d'un réservoir peut entraîner l'évacuation d'eau plus froide ou plus chaude que ce que le cours d'eau aurait reçu sans la présence d'un barrage. La température de l'eau évacuée de même que les conséquences des lâches sur la pêche pratiquée en aval dépendent du degré de stratification, du niveau des ouvrages d'évacuation et de la nature des espèces piscicoles.

- vertical mixing can be induced at the water surface by wind and wave forces (entrainment).

In situations where the warming up forces exceed the vertical mixing forces (warm, calm periods) thermal stratification is a self enforcing process. In a few cases, finally the cool hypolimnion disappears even near the bottom of the reservoir. In periods with cool and/or stormy weather, entrainment occurs between the cool *hypolimnion* and the *epilimnion* (Fig. 4).

Stratification can also be produced hydraulically by discharging water from a gate placed at mid-height of the dam as was detected at reservoirs in S. Paulo State, Minas Gerais (Furnas, Brazil) and was described also in a Spanish reservoir. This is, however, a rare phenomenon.

The inflow of a turbulent river stream can lead to extra mixing, but inflow of a river with a water temperature different from the epilimnion can promote stratification.

In general stratification is caused by density variations set up by differences in temperature, salinity, sediment load, turbidity and other water quality parameters.

While this model is applicable to all deep reservoirs, whatever their geographical location, it appears that reservoirs in tropical regions retain their thermal stratification longer than in temperate, northern climates. For instance, in the Brokopondo Reservoir (Surinam), this stratification virtually prevents the mixing of water by the wind and inversion of mass, leaving the dissolved oxygen in the surface layer in warmer water. Indeed, in hot tropical environments, the thermal stratification is more intense and induces a much more stable thermal barrier than in cooler environments, due to the water density gradient (Fig. 5). A temperature difference of 5 °C at 30 °C will require forces five times larger to overcome it than the same temperature gradient at 10 °C.

Amazonian reservoirs stratify for longer periods and are warm *monomictic* (one circulation period). Anoxic hypolimnion can occur.

As the decomposition of organic matter contributes to decreasing the dissolved oxygen content in the deep water layers, water mixing following a seasonal temperature change can eventually be positive for fish since the levels of dissolved oxygen can be increased at all depths of the water column. However, the mixing may also increase turbidity and suspended sediments. What has been noted first is a transient reduction in oxygen levels for two weeks or so after this seasonal turnover.

Reservoir stratification can result in the release of waters of colder or warmer temperatures than the river would experience without a dam. Whether the releases will be cooler or warmer and whether the results will be beneficial or not to the downstream fishery, depend upon the degree of stratification, the level of the outlet works, and nature of the river fishery.

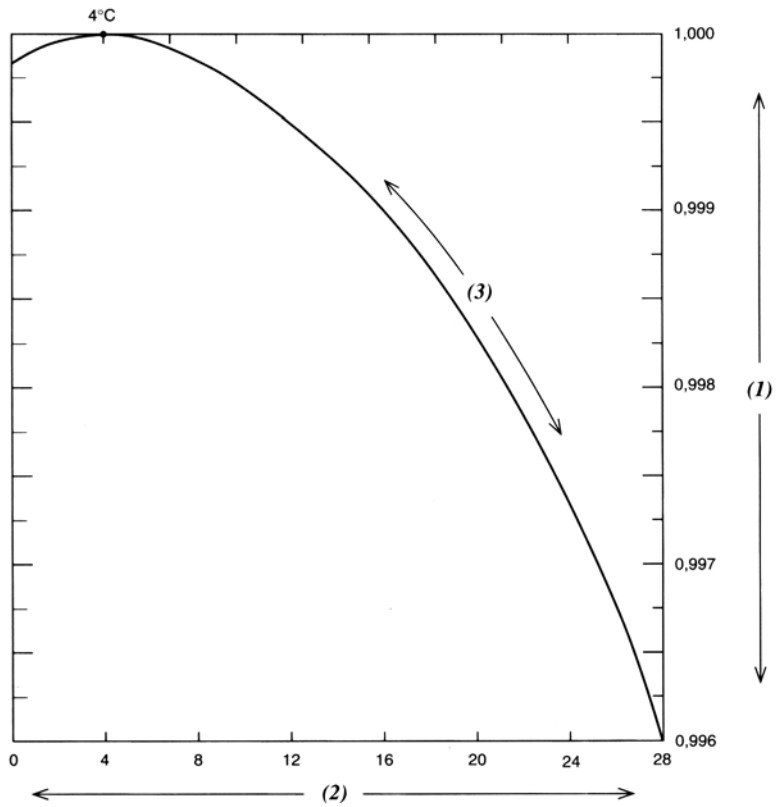
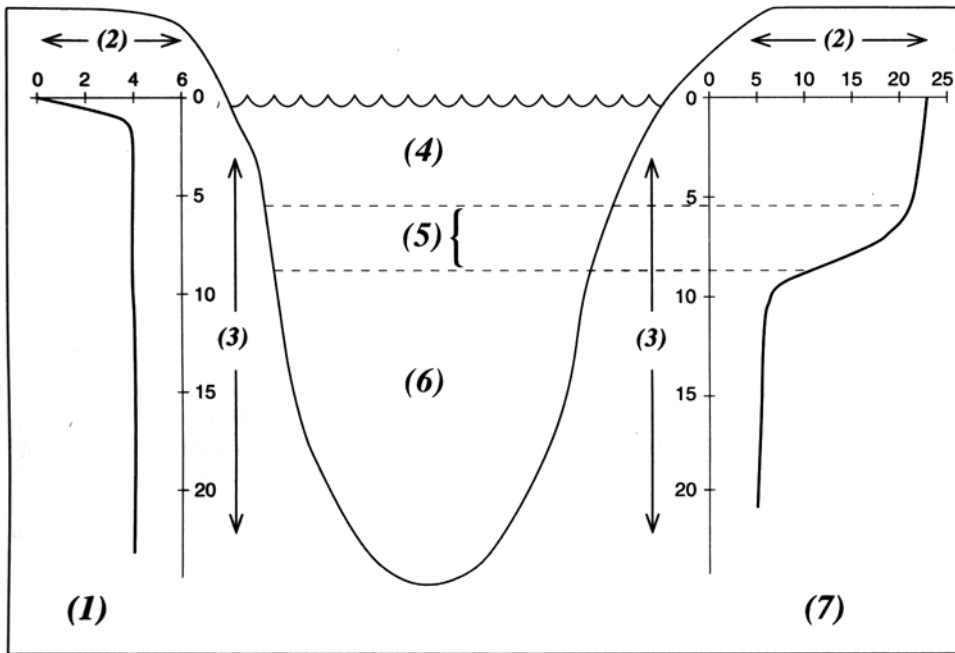


Fig. 4

Thermal Stratification in a Northern Temperate Reservoir (theoretical diagram)

Stratification thermique dans une retenue d'une région septentrionale tempérée (schéma théorique)

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| (1) Winter | (1) Hiver |
| (2) Temperature (°C) | (2) Température (°C) |
| (3) Depth (meter) | (3) Profondeur (en mètres) |
| (4) Epilimnion | (4) Épilimnion |
| (5) Thermocline | (5) Thermocline |
| (6) Hypolimnion | (6) Hypolimnion |
| (7) Summer | (7) Été |

Fig. 5

Variation of Water Density with Temperature

Variation de la densité de l'eau en fonction de la température

- | | |
|--|---|
| (1) Density (g/cm ³) | (1) Densité (g/cm ³) |
| (2) Temperature (°C) | (2) Température (°C) |
| (3) Density (g/cm ³)
in relation to temperature | (3) Densité (g/cm ³)
en fonction de la température |

Note: Water density for reservoirs in a temperate zone; a 4 °C difference in temperature results in a smaller water density difference than in warmer reservoirs.

Remarque: Densité de l'eau de réservoirs d'une zone tempérée; une différence de température de 4 °C se traduit par une différence de densité plus petite que celle enregistrée dans les réservoirs d'une zone plus chaude.

Mesures d'atténuation

On peut prédire les caractéristiques et la stabilité thermiques d'un réservoir à partir de modèles. Si on prévoit des problèmes, on pourra envisager des mesures d'atténuation telles que :

1. modifications de la configuration de l'ouvrage d'entrée;
2. déstratification du réservoir;
3. ouvrages de vidange à niveaux multiples pour atténuer les effets en aval;
4. brassage et aération par jet ou air comprimé (Japon (1), île de Jersey, Australie).

3.1.2. Propriétés chimiques

La retenue d'une rivière fait intervenir un certain nombre de phénomènes qui modifient la chimie des eaux fluviales; il s'ensuit que les propriétés chimiques de l'eau de la retenue et de l'eau évacuée du barrage diffèrent souvent de ce qu'elles étaient avant la création de la retenue. Ces changements sont dus à des facteurs, tels que la nature des terres inondées, la composition chimique de l'eau entrant dans la retenue, son temps de séjour dans le réservoir, le climat, ainsi que la structure thermique et la morphologie du réservoir. Ces facteurs et d'autres peuvent favoriser l'entrée de composants chimiques dans la retenue et, par la suite, agir sur leur traitement.

La mise en eau d'un réservoir et la prolongation du *temps de séjour* modifient la teneur en éléments nutritifs de l'eau, son degré de minéralisation et, par conséquent, la productivité primaire. Ce phénomène tend toutefois à se stabiliser au cours de l'exploitation à long terme de la retenue. Les réservoirs avec un temps de séjour court ont tendance à se stabiliser plus rapidement que ceux avec un temps de séjour plus long.

a) Oxygène dissous

Effets

Il est très important pour la vie aquatique que la teneur en oxygène dissous de l'eau soit élevée. De plus, si on prévoit de faibles teneurs en oxygène dans les réservoirs où les sédiments contiennent des métaux lourds, il est possible que des substances toxiques soient libérées à cause de réactions chimiques *anoxiques*.

La teneur en oxygène dissous d'un nouveau réservoir dépend principalement de la décomposition de la matière organique du sol et de la végétation submergée, de la demande chimique ou biologique en oxygène, de la capacité de réaération du réservoir, de la production d'oxygène par les végétaux aquatiques, de la quantité de substances transportées depuis l'amont et du brassage naturel de l'eau. (Voir aussi les remarques sur la stratification thermique, l'action du vent et des vagues, et le temps de séjour.)

(1) Au Japon, ces mesures sont plus souvent utilisées contre l'eutrophisation que contre la stratification thermique.

Mitigation

These thermal characteristics and thermal stability can be predicted by models for a reservoir. If any problems are anticipated, mitigation measures can be considered. These include :

1. changes in inlet structure configuration;
2. in-reservoir destratification;
3. multilevel outlet works for mitigation of downstream effects;
4. positive mixing and aeration by fountain jets or compressed air (Japan (1), Jersey, Channel Isle, Australia).

3.1.2. Chemical Properties

The impoundment of a river involves many processes which modify the chemistry of the river water, and as a result the chemistry of the water in the impoundment and the releases from the dam are frequently different from the river before impoundment. The changes depend upon factors such as the nature of the land inundated, the chemistry of the water coming in, the residence time of water in the reservoir, the thermal structure of the reservoir, the climate of the reservoir site, and the morphology of the reservoir. These factors and others may involve the input of chemical constituents into the impoundment and how these constituents are processed.

The flooding of a reservoir and the extension of the *residence time* alters the content of nutrients in the water, its mineralization and, consequently, the primary productivity. This effect tends, however, to stabilize over the long-term operation of the impoundment. Reservoirs with short residence time tend to stabilize in less time than reservoirs with long residence time.

a) Dissolved Oxygen

Effects

A high dissolved oxygen content of water is very important to the aquatic life. Moreover, if low oxygen concentrations are anticipated, in reservoirs with heavy metals in the sediments, these toxic substances may be released as a result of *anoxic* chemical reactions.

The dissolved oxygen content of a new reservoir largely depends on the decomposition of organic matter from the soil and from submerged vegetation, on chemical or biological demand for oxygen, the reservoir's reaeration capacity, the production of oxygen by aquatic plantlife, and the amount of material transported from upstream and of natural water mixing. The dissolved oxygen content of most new reservoirs is mostly low due to demand from submerged vegetation, but generally this vastly improves by the third year of impoundment. (Also see remarks on thermal stratification, wind and wave action, residence time).

(1) In Japan these measures are more often used against eutrophication than against thermal stratification.

Les teneurs en oxygène dissous varient entre l'épilimnion et l'hypolimnion en raison de la réduction du brassage vertical due à la stratification thermique, associée à la présence de matières à demande biochimique en oxygène, le long de la colonne d'eau.

La création et la gestion du réservoir peuvent aussi avoir une incidence sur la disponibilité d'oxygène dans la retenue et dans l'eau évacuée. En effet, dans les réservoirs profonds, on observe souvent une stratification des eaux, créée par les courants plus forts en amont des prises d'eau, alors que les vitesses sont plus faibles au-dessus et au-dessous de ces ouvrages. Il peut s'ensuivre un effet de barrière entre les eaux de surface et de fond, d'où une diminution du transport d'oxygène vers les couches inférieures. À cet égard, le niveau des prises d'eau constitue un paramètre important qu'il faut définir correctement au moment de la conception des ouvrages.

Mesures d'atténuation

Il faut prendre soin d'évaluer de façon précise les mesures d'atténuation applicables à un réservoir existant ou futur, surtout si l'on prévoit une faible teneur en oxygène dissous dans le réservoir ou dans les eaux évacuées. À cet effet, il est nécessaire, tout d'abord, de déterminer les causes de la faible teneur en oxygène prévue. S'il est nécessaire d'adopter des mesures d'atténuation on pourra avoir recours aux mesures suivantes :

- réaération du réservoir;
- injection d'oxygène dans le réservoir;
- aération aux turbines;
- aération des ouvrages de vidange;
- déversoirs de réaération;
- ouvrages de vidange à niveaux multiples;
- défrichement du réservoir;
- gestion des bassins hydrographiques;
- aménagement des bassins fluviaux;
- niveau et utilisation de l'évacuateur de crue.

Pour leur application à une situation spécifique, chacune de ces mesures nécessite de nombreuses études scientifiques et techniques. Pour plus de détails, consulter la bibliographie (CIGB 1991, 17^e Congrès).

b) Nuisances et substances toxiques

Effets

Le degré de contamination par des nuisances et des composés toxiques dépend de plusieurs facteurs, tels que la submersion des terres, les apports (particulièrement dans les zones habitées), l'équilibre entre l'*adsorption* et la *désorption* des polluants liés aux sédiments, ainsi que le dépôt des polluants par ces sédiments. Dans certaines régions (grandes monocultures des tropiques, bouclier précambrien canadien, etc.), la submersion du sol et des végétaux constitue une source potentielle de métaux lourds (mercure), de pesticides et d'autres polluants. Ces subs-

Dissolved oxygen levels vary from the epilimnion to the hypolimnion due to the mitigation of vertical mixing resulting from the onset of thermal stratification coupled with the presence of biochemical oxygen demanding materials through the water column.

The creation and management of the reservoir may also affect the availability of oxygen in the impoundment and the releases. Indeed, in deep reservoirs, stratification of water created by the stronger currents upstream of the intakes is often seen while velocities are lower above and below these structures; there can follow a barrier effect between the surface and bottom waters, leading to a drop in transportation of oxygen to the lower levels. In this regard, the level of the intakes is an important parameter that must be accurately defined when the works are designed.

Mitigation

Care must be taken to assess accurately the need for mitigation in a planned or existing reservoir particularly if a low dissolved oxygen condition in the reservoir or in the releases is predicted. In order to achieve this, it is first necessary to identify the causes of the probable low oxygen content. If mitigation is necessary the following different actions can be considered :

- in-reservoir re-aeration;
- in-reservoir injection of oxygen;
- turbine venting;
- outlet works aeration;
- re-aeration weirs;
- multilevel outlet works;
- reservoir clearing;
- watershed management;
- river basin management;
- spillway level and use.

Each of these actions involve a great deal of scientific and engineering study to be applied to a specific situation. The reader is referred to the references for further details (ICOLD 1991, 17th Congress).

b) Nuisance and Toxic Substances

Effects

The extent to which a reservoir is contaminated by nuisance and toxic compounds depends on several factors, including the submersion of land, the inflow (particularly in inhabited areas), the balance between *adsorption* and *desorption* of pollutants associated with sediment, and their deposition through these sediments. In some areas (large monocultures in the Tropics, Canadian Precambrian Shield, etc.), the submersion of soil and its vegetation is a potential source of heavy metals

tances entrent dans la tranche d'eau par simple lessivage ou par suite de la décomposition de la matière organique du sol et de la végétation. Leur libération et leur transport sont fortement influencés par la teneur en oxygène dissous dans la tranche d'eau.

Dans les régions habitées, la diminution du brassage de l'eau, l'augmentation du temps de séjour et l'évacuation de déchets municipaux, industriels et agricoles représentent des facteurs potentiels d'augmentation de la pollution de l'eau et des berges.

Le processus d'adsorption et de désorption des polluants associés aux sédiments de fond ou aux sédiments en suspension varie selon les caractéristiques de l'eau environnante, telles que la température, le potentiel d'oxydoréduction, le *pH* et l'activité bactérienne.

Si l'augmentation de la sédimentation peut contribuer à abaisser la concentration de polluants dans l'eau, des conditions anoxiques en eau profonde ainsi qu'une diminution du *pH* et du potentiel d'oxydoréduction peuvent provoquer la désorption des polluants des sédiments et leur libération dans la tranche d'eau.

La décomposition de la matière organique du sol submergé et la sédimentation des organismes planctoniques peuvent diminuer la teneur en oxygène dissous dans les couches profondes du réservoir et libérer de fortes concentrations de substances réduites très toxiques, telles que des ions sulfurés, ferreux et manganés, ainsi que du mercure organique. Dans des conditions *anoxiques*, d'autres métaux lourds s'assimilent très bien aux sédiments. Une telle libération de nuisances et de substances toxiques a causé de nombreux problèmes dans les réservoirs de la Tennessee Valley Authority, tant en amont qu'en aval.

La capacité de dilution de l'eau d'un réservoir peut limiter les effets de la plupart des polluants. Ce phénomène a cependant une action réduite sur les composés toxiques (par exemple, le mercure) qui s'accumulent dans la chaîne alimentaire à des concentrations telles que la consommation de poisson peut s'avérer dangereuse pour les humains.

Dans les régions tempérées du nord, plusieurs facteurs expliquent l'augmentation de la teneur en mercure observée dans un certain nombre de réservoirs. La principale cause est l'inondation des sols organiques et de la végétation terrestre qui contiennent des accumulations de mercure.

À la limite, la matière organique (source de mercure) stimule l'activité des bactéries qui, par *méthylation*, transforment le mercure inorganique en mercure organique, dès lors disponible dans l'eau et assimilable dans la chaîne alimentaire. À noter que dans les eaux à faible pouvoir tampon, une diminution du *pH* augmente l'action de méthylation des bactéries et que le taux de méthylation est plus élevé en l'absence d'oxygène, comme c'est le cas dans les couches du lit. Parallèlement, l'inondation de mousses, de tourbe et d'humus accélère aussi le processus de méthylation. Bien que ces phénomènes n'aient été étudiés qu'en régions nordiques tempérées, il est fort probable qu'on les retrouve également dans les régions plus au sud.

Des études faites notamment dans des réservoirs de Finlande et du Canada montrent que l'accumulation de mercure dans la chair des poissons est élevée, surtout dans les nouveaux réservoirs, mais qu'elle diminue progressivement pour

(mercury), pesticides and other pollutants. These substances enter the water column simply through leaching, or through release from the decomposition of organic matter in soil and plantlife. Their release and transport is strongly affected by the dissolved oxygen concentration within the water column.

In inhabited areas, the reduction in water mix, the increase in residence time and municipal, industrial and agricultural disposals are all factors likely to increase the pollution of water and banks.

The process of adsorption and desorption of pollutants associated with bottom or suspended sediment varies depending on such properties of the surrounding water as temperature, oxygen redox potential, *pH* and bacterial activity.

While increased sedimentation can contribute to lowering the rate of pollutants in the water, a decrease in *pH*, anoxic conditions in deep water and a lower *redox potential* can provoke desorption of pollutants from sediment and their discharge into the water column.

The decomposition of the organic matter from the flooded soil and the sedimentation of planktonic organisms may lead to the depletion of dissolved oxygen in the deep layers of the reservoir and to the release of heavy concentrations of highly toxic reduced substances, such as sulphide, ferrous and manganese ions, as well as organic mercury. Other heavy metals are, under *anoxic* conditions, very well adsorbed to the sediment. Such a discharge of nuisances and toxic substances caused numerous problems in the reservoirs of the Tennessee Valley Authority, both upstream and downstream.

The dilution capacity of a reservoir's water may limit the effects of most pollutants. However, this phenomenon has reduced action on toxic compounds (such as mercury) whose content is accumulated in the food chain to such concentrations that fish consumption may prove dangerous for humans.

In northern and temperate regions, several factors explain the increase in mercury concentrations observed in a number of reservoirs. The main cause is the flooding of organic soil and terrestrial vegetation which contain accumulated mercury.

In an extreme case, organic matter, as well as being a source of mercury, stimulates the activity of bacteria which, through *methylation*, convert inorganic mercury into organic mercury that is immediately available in the water and can be assimilated into the food chain. Note that in water with low buffer capacity, a drop in *pH* increases the methylation effect of bacteria and this methylation rate is higher when oxygen is depleted, as in the bed layers. At the same time, the flooding of mosses, peat and humus also accelerates the methylation process. Although this topic has generally been addressed only in northern, temperate regions, it is likely that the same processes may occur in more southerly parts of the world.

Studies conducted in Finnish and Canadian reservoirs in particular show that the accumulation of mercury in the flesh of fish may be high especially in newly created reservoirs, but gradually decreases to natural levels after approximately

atteindre un niveau naturel après 20-30 ans (réservoirs Smallwood, lac Southern Indian, La Grande 2, Caniapiscau, Canada).

Lorsqu'on prévoit un tel problème dans un très petit réservoir, il est possible de limiter cet effet en enlevant la couverture de sol avant la mise en eau, ou encore en pêchant les individus les plus contaminés pour ensuite réensemencer la retenue avec de jeunes spécimens non contaminés.

Mesures d'atténuation

On peut aborder les mesures d'atténuation des effets des nuisances et des substances toxiques sous deux angles : (1) en réduisant au minimum ou en éliminant les sources de contamination ou, (2) en prenant des mesures pour changer les conditions qui prévalent dans le réservoir afin de modifier l'état chimique final des substances. Au nombre des mesures d'atténuation, mentionnons :

- la couverture, avant la mise en eau, des zones du réservoir contenant de fortes concentrations de matières chimiques indésirables;
- la gestion des bassins hydrographiques;
- la déstratification du réservoir;
- le défrichage du réservoir.

Dans les zones de dépôts des déchets, il faut prendre des mesures d'aménagement du territoire.

c) Éléments nutritifs et degré de minéralisation

Effets

Les principales sources d'éléments nutritifs et de minéraux dans une retenue proviennent de la rivière. Parmi celles-ci, on retrouve des contaminants fluviaux, agricoles, domestiques et industriels. La création d'un réservoir donne souvent lieu à un accroissement de l'urbanisation et des activités agricoles et industrielles, en amont, ce qui entraîne une augmentation de la quantité de déchets domestiques, agricoles et industriels.

Au début, la mise en eau d'un réservoir contribue souvent à augmenter considérablement la quantité d'éléments nutritifs et le degré de minéralisation, ce qui a des effets bénéfiques, comme la hausse de la productivité, mais également des effets négatifs, tels que la prolifération des végétaux dans l'eau, des problèmes de goût et d'odeur, et un épuisement de l'oxygène.

La décomposition de la *biomasse* inondée ainsi que l'apport d'éléments nutritifs et de minéraux qui en résulte sont des paramètres difficiles à évaluer, étant donné que chaque substance se décompose suivant un modèle chimique spécifique où entrent en jeu des composantes intermédiaires et une interaction avec d'autres substances. Il faut également considérer la quantité de *biomasse* submergée, qui varie selon les régions; par exemple, une forêt tropicale humide peut avoir une biomasse naturelle de 300 à 900 t/ha, tandis que la biomasse d'une forêt tempérée ne dépasse généralement pas 400 t/ha. La biomasse revêt une importance particulière en raison de la quantité de phosphore qu'elle peut libérer (environ 50 kg/ha dans les zones tempérées), et parce qu'elle constitue un facteur clé du processus d'*eutrophisation*.

20-30 years (Smallwood, Southern Indian Lake, La Grande 2, Caniapiscau Reservoirs, Canada).

In very small reservoirs where the problem is anticipated, this effect may be limited by removing the soil cover before flooding, or harvesting the most contaminated fish and then reintroducing uncontaminated specimens into the water body.

Mitigation

Actions for mitigation of nuisance and toxic substance effects can be considered to be divided into two approaches : (1) minimizing or eliminating the source of these substances or, (2) actions to change the reservoir conditions to change the chemical end state of the substance. Some possible mitigation actions include :

- areas in the reservoir site containing high concentrations of undesirable chemicals can be covered before filling the reservoir;
- watershed management;
- reservoir destratification;
- reservoir clearing.

In waste disposal areas land use planning techniques must be adopted.

c) Nutrients and Mineralization

Effects

The main sources of nutrients and minerals in an impoundment are carried by the river. These include stream, agricultural, domestic, and industrial contaminants. The creation of a reservoir often involves increased upstream settlement with agriculture, industrialization, and urbanization, entailing an increase in agricultural, industrial, and domestic waste.

Initially, the flooding of a reservoir is often associated with a substantial increase in nutrients and the level of minerals which cause, on the one hand, beneficial effects such as higher productivity, but also negative effects including the proliferation of plants, taste and odour problems, and a depletion of oxygen.

The decomposition of flooded *biomass* and its contribution in nutrients and minerals is a difficult process to evaluate, as each substance decomposes according to a specific chemical pattern, with intermediary compounds and interactions with other substances. The amount of submerged *biomass*, which varies according to the region, must also be borne in mind; for instance, a wet tropical forest may have a natural biomass of 300-900 t/ha, whereas the biomass in a temperate forest rarely exceeds 400 t/ha. This biomass is especially significant for the amount of phosphorus it may release, approximately 50 kg/ha (temperate), and the fact that this element is a key factor in the *eutrophication* process.

On peut obtenir une indication des effets potentiels de l'inondation de la biomasse en calculant le rapport entre la superficie inondée (indice de la quantité de matière organique et de minéraux disponible) et le volume d'eau annuel transitant dans la retenue (volume d'eau disponible pour diluer les apports provenant des sols inondés). Ce simple calcul donne une bonne idée des répercussions sur la qualité de l'eau et sur la productivité d'un réservoir, auxquelles on peut s'attendre. Le Tableau 1 fournit plusieurs exemples où un tel calcul a été fait, et où les résultats ont été comparés aux observations sur le terrain. Il faut tenir compte de la quantité de phosphore contenu dans la rivière, parce que ce dernier s'accumule dans le réservoir.

La décomposition de la matière organique tend à augmenter la concentration de phosphore nécessaire à la croissance du *phytoplankton* et des algues. Toutefois, ce problème est en général moins important en climat froid et tempéré, où la température de l'eau limite la croissance du *phytoplankton* (réservoirs La Grande 2 et Caniapiscou, Canada). Le problème peut, par contre, être plus sérieux dans les régions plus chaudes et accélérer le vieillissement des retenues.

Le déboisement préalable de la zone d'inondation d'une retenue, tout comme le décapage du terrain, peut contribuer à limiter les apports de matières et les problèmes liés aux grandes quantités d'éléments nutritifs. Cette mesure est particulièrement intéressante pour les retenues de faible superficie, mais elle n'est utile que si la quantité d'éléments nutritifs apportée par la rivière est très limitée. Elle n'est pas recommandée ou peut être impossible pour les grandes retenues dans les régions tropicales. Dans ces derniers cas, la deuxième pousse dans les zones nettoyées peut être plus nuisible par rapport à l'état initial. Son coût peut également être très élevé.

À la retenue Startafan, les effets de l'inondation du sol sur la qualité de l'eau sont prépondérants. Cependant, dans les réseaux hydrographiques eutrophes, tels que les réseaux fluviaux des plaines littorales d'Europe de l'Ouest et, à long terme, dans les réseaux *mésotrophes*, les effets des matières en dissolution ou en suspension dans l'écoulement entrant deviendront plus importants.

Les éléments nutritifs apportés dans un réservoir par la rivière, par la nappe d'eau souterraine ou par le fond du réservoir en déterminent l'état trophique. L'état trophique constitue une évaluation de la productivité de l'eau et de la capacité du réservoir à maintenir un peuplement biologique. L'eutrophisation consiste en une accumulation de sels nutritifs, qui provoque des changements dans les lacs et les réservoirs. On peut classer les lacs et les réservoirs selon leur teneur en substances nutritives ou leur état trophique. On les appelle *oligotrophes* (pauvres en substances nutritives), *mésotrophes* (ayant une capacité nutritive moyenne) et *eutrophes* (riches en substances nutritives).

Un réservoir très productif ou très trophique est dit *eutrophe*. Il connaît une croissance démesurée d'algues et de plantes aquatiques, et la qualité de l'eau y est considérée comme inférieure.

Dans les régions tropicales, les températures élevées de l'eau (plus de 35 °C) et les apports énergétiques peuvent causer une eutrophisation très rapide, même en présence d'une très petite quantité de substances nutritives.

Du fait que l'eau potable provient en grande partie de réservoirs, l'importance du phénomène d'eutrophisation s'est accrue, même dans les climats tempérés. Se-

A clue as to the potential effects of flooding this biomass may be obtained by calculating the ratio between the surface area flooded (an indicator of the quantity of organic matter and minerals available) and the annual volume of water passing through the impoundment (the volume of water available to dilute the inflow from the flooded soil). This simple circulation provides a good idea of the impacts that may be expected on the water quality of a given reservoir as well as on its productivity. Table 1 illustrates several examples of where such a calculation was made and compared with on-site observation. The phosphorus load of the river has to be taken into account because the phosphorus is accumulated in the reservoir.

The decomposition of organic matter tends to increase the phosphorus content available for the growth of *phytoplankton* and algae. But this problem is generally a minor one in cold temperate climates, where water temperature is the factor limiting the growth of *phytoplankton* (La Grande 2 and Caniapiscou Reservoirs, Canada). On the other hand, the problem may be more serious in warmer regions, accelerating the maturing of impoundments in such areas.

Prior clearing of the flood zone of a future reservoir, as well as topsoil stripping, may help limit the amount of material brought down and the problems associated with large quantities of nutrients. This measure is particularly worthwhile for small impoundments but only useful if the nutrient load of the incoming river is very small, and may not be advisable or possible for large reservoirs in tropical countries. In these latter cases, second growth in areas cleared first may be more detrimental than the original cover. Cost may also be extreme.

The impact of the flooded soil upon water quality dominates at the Startafan impoundment, but in eutrophic water systems such as in western European low lands river systems, and in the long run in *mesotrophic* systems, the impact of materials in solution or suspension in the influx will become more important.

Nutrients which enter a reservoir from the river, ground water, or from the reservoir bottom determine the trophic state of the reservoir. The trophic state is an evaluation of the productivity of the waters and the ability of the reservoir to sustain a biological community. Eutrophication is the process of accumulation of nutrients and the changes that occur in lakes and reservoirs. Lakes and reservoirs can be classified according to the level of their nutrient content or trophic state. The sequence is from *oligotrophic* (poorly nourished), through *mesotrophic* (intermediately nourished), to *eutrophic* (well nourished).

A very productive, or very trophic reservoir, is *eutrophic* and experiences excessive growths of algae and aquatic plants to the point where water quality is likely to be inferior.

In tropical areas, high water temperatures (more than 35 °C) and energy inputs can result in eutrophication in a very short time even with very low nutrient loading.

The phenomenon of eutrophication has become increasingly important, even in temperate climates, because drinking water is supplied to a large extent by reser-

Tableau 1
Rapport entre la superficie inondée et le volume d'eau annuel de certains réservoirs,
et changements observés

Réservoir (climat)	Superficie inondée en km ² (A)	Volume d'eau annuel en km ³ (B)	Rapport A/B	Changements observés		
				Degré de minéralisation	Augmentation d'éléments nutritifs et prolifération de végétaux	Oxygène dissous
La Grande 2 Canada (nordique)	2 600	54-108	24-48	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de 0,3 unité du pH • Aucune modification de la conductibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de 5 µg/l du phosphore total 	<ul style="list-style-type: none"> • Légère diminution du pourcentage de saturation des eaux de surface • Anoxie en eau profonde seulement à la fin de la période de glace
Caniapiscou Canada (nordique)	3 400	25	137	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de 0,3 unité du pH • Aucune modification de la conductibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de 9 µg/l du phosphore total 	<ul style="list-style-type: none"> • Légère diminution du pourcentage de saturation des eaux de surface • Anoxie en eau profonde seulement à la fin de la période de glace
Assouan Egypte (tropical sec)	2 700-4 500	80	34-56	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des sels dissous à cause de l'évaporation 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune augmentation des éléments nutritifs après la mise en eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Anoxie en eau profonde seulement durant la période de stratification thermique
Danjankou Chine (tempéré chaud)	Environ 700	40	18	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun changement du pH 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet négatif par suite de l'augmentation des éléments nutritifs (en partie à cause d'une plus grande quantité de matières externes) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne oxygénation des eaux de surface • Épuisement de l'oxygène en eau profonde durant la période de stratification thermique
Lac Volta Ghana (tropical)	Environ 6 400	44	145	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du pH 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des éléments nutritifs • Prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Importante diminution de l'oxygène dissous dans les eaux de surface • Anoxie en eau profonde
Lac Kariba Zambie (tropical)	Environ 4 200	57	74	<ul style="list-style-type: none"> • Modification de la conductibilité à cause de l'augmentation de l'évaporation et du débit 	<ul style="list-style-type: none"> • Circulation temporaire des éléments nutritifs • Prolifération presque continue d'algues durant la mise en eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Anoxie sous la température de stratification
Lac Brokopondo Surinam (tropical)	Environ 1 350	8,5	160	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune modification de la conductibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Prolifération des algues et des jacinthes d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte importante d'oxygène dissous dans les eaux de surface • Anoxie à des profondeurs excédant 2,5 m (stratification thermique)
Lac Kainji Nigéria (tropical)	Environ 700	67	10	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune modification de la conductibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques, mais aucun effet nuisible 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'oxygène dissous dans les eaux de surface, mais des concentrations dépassant quand même 4 mg/l • Anoxie sous la thermocline

• D'après : Smith, 1986; Mancy, 1980; Ackerman *et al.*, 1973; Garzon, 1984; Schetagne et Roy, 1985.

Table 1
Ratio of Land Area Flooded to Annual Water Volume at Several Reservoirs,
with Changes Observed

Reservoir (climate)	Land area flooded in km ² (A)	Annual water volume, in km ³ (B)	Ratio A/B	Changes observed		
				Mineral level	Increase in nutrients and proliferation of plantlife	Dissolved oxygen
La Grande 2 Canada (northern)	2 600	54-108	24-48	<ul style="list-style-type: none"> pH down by 0.3 units No change in conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> Total phosphorus up by 5 µg/l 	<ul style="list-style-type: none"> Slight drop in percentage of saturation of surface water Bottom water anoxic only at end of ice cover period
Caniapiscou Canada (northern)	3 400	25	137	<ul style="list-style-type: none"> pH down by 0.3 units No change in conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> Total phosphorus up by 9 µg/l 	<ul style="list-style-type: none"> Slight drop in percentage of saturation of surface water Bottom water anoxic only at end of ice cover period
Aswan Egypt (dry tropical)	2 700-4 500	80	34-56	<ul style="list-style-type: none"> Increase in dissolved salts due to evaporation 	<ul style="list-style-type: none"> No increase in nutrients due to flooding 	<ul style="list-style-type: none"> Bottom water anoxic only during thermal stratification period
Danjankou China (warm temperate)	Approx. 700	40	18	<ul style="list-style-type: none"> No change in pH 	<ul style="list-style-type: none"> No negative effects due to increase in nutrients (partially because of higher quantity of external material) 	<ul style="list-style-type: none"> Surface water well oxygenated Oxygen depletion in bottom water during thermal stratification period
Lake Volta Ghana (tropical)	Approx. 6 400	44	145	<ul style="list-style-type: none"> pH down 	<ul style="list-style-type: none"> Increase in nutrients Proliferation of phytoplankton and aquatic plants 	<ul style="list-style-type: none"> Large drop in dissolved oxygen in surface water Bottom water anoxic
Kariba Lake Zambia (tropical)	Approx. 4 200	57	74	<ul style="list-style-type: none"> Change in conductivity due to increased evaporation and flow 	<ul style="list-style-type: none"> Temporary circulation of nutrients Almost continual proliferation of algae during priming 	<ul style="list-style-type: none"> Anoxic conditions beneath stratification temperature
Lake Brokopondo Surinam (tropical)	Approx. 1 350	8.5	160	<ul style="list-style-type: none"> No change in conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> Proliferation of algae and water hyacinth 	<ul style="list-style-type: none"> Major depletion of dissolved oxygen in surface water Anoxia below depths of 2.5 m (thermal stratification)
Lake Kainji Nigeria (tropical)	Approx. 700	67	10	<ul style="list-style-type: none"> No change in conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> Proliferation of phytoplankton and aquatic plants, but without any harmful effects 	<ul style="list-style-type: none"> Decrease in dissolved oxygen in surface water but concentration still above 4 mg/l Anoxia beneath the thermocline

• From : Smith, 1986; Mancy, 1980; Ackerman *et al.*, 1973; Garzon, 1984; and Schetagne and Roy, 1985.

lon l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE, 1982), il faut distinguer trois niveaux trophiques :

oligotrophe : faible teneur en azote, phosphore ($< 10 \text{ mg Pm}^{-3}$) et chlorophylle-a (valeur moyenne annuelle $< 2,5 \text{ mg m}^{-3}$ et valeur maximale $< 8 \text{ mg m}^{-3}$);

eutrophe : teneur en phosphore ($> 20\text{-}35 \text{ mg Pm}^{-3}$) et en chlorophylle-a (valeur moyenne annuelle $> 8 \text{ mg m}^{-3}$ et valeur maximale $> 25 \text{ mg m}^{-3}$);

mésotrophe : valeurs intermédiaires.

De nombreux facteurs influencent l'eutrophisation réelle et perçue d'un réservoir. On connaît mieux certains de ces facteurs, si ce n'est la plupart d'entre eux, par l'étude du processus d'eutrophisation des lacs naturels. Toutefois, l'application d'indices et de modèles aux réservoirs ne devrait fournir qu'une orientation générale, puisque les conditions particulières à un réservoir peuvent grandement influencer son état trophique (CIGB, 1981, et 17^e Congrès de la CIGB, 1991).

La disponibilité de fortes concentrations de phosphore et d'azote est en grande partie responsable du déclenchement du processus d'eutrophisation. On observe ce phénomène surtout dans les retenues relativement récentes des régions tropicales. La décomposition de la matière organique qui suit la mise en eau d'un réservoir, à laquelle s'ajoute l'utilisation d'engrais et de détergents, ainsi que l'augmentation du volume des eaux usées industrielles et urbaines, sont les principales causes de la mise en circulation d'éléments nutritifs.

Certains lacs tropicaux, tels que le lac Volta (Ghana), le lac Kariba (Zambie et Zimbabwe) et le lac Brokopondo (Surinam) sont des exemples caractéristiques d'eutrophisation.

Les premiers symptômes se remarquent par la surproduction de *macrophytes*, d'algues et de micro-organismes en suspension, ce qui contribue à diminuer la transparence de l'eau. Par la suite, on assiste à la formation massive de matières putrescibles végétales et animales qui, avec les algues mortes, se déposent au fond de la retenue. Cela suscite une demande très forte en oxygène, pouvant même causer l'*anaérobie* des couches d'eau profondes, la libération subséquente d'hydrogène sulfuré et d'ions ferreux, manganéux et d'ammonium libres, ainsi que la formation de couches de gaz.

L'abondance de méthane, d'éthane et d'acides (combinés avec des matières organiques) peut, durant la chloruration dans une installation d'épuration, favoriser la formation de dérivés chlorés (trialométhanes) et la croissance d'algues toxiques, mettant ainsi en danger la population et le bétail.

Il s'ensuit des répercussions sur l'utilisation de l'eau à des fins domestiques et industrielles (goût et odeur désagréables, encrassement des filtres des prises d'eau, augmentation de la corrosion due à la présence des ions libres, etc.), ainsi que pour les loisirs comme la natation (possibilité d'irritations cutanées) et le nautisme (difficulté de naviguer en raison de la luxuriance des algues et de la végétation). La pêche récréative et commerciale est également touchée puisque la détérioration de la qualité de l'eau est telle que seules les espèces de poisson très résistantes peuvent survivre et se développer.

voirs. Three trophic levels (as defined by the OECD in 1982) should be distinguished :

oligotrophic : low concentrations of azote, phosphorus ($< 10 \text{ mg Pm}^{-3}$) and chlorophyll a ($< 2.5 \text{ mg m}^{-3}$ as the mean annual value and $< 8 \text{ mg m}^{-3}$ the peak value);

eutrophic : with concentrations of phosphorus $> 20\text{-}35 \text{ mg Pm}^{-3}$ and chlorophyll a with a mean annual value of $> 8 \text{ mg m}^{-3}$ and a peak value of $> 25 \text{ mg m}^{-3}$;

mesotrophic : with intermediate values.

There are many factors which influence the actual and perceived eutrophication of a reservoir. Understanding of many, if not most, of these is based upon the study of the processes of eutrophication of natural lakes. The application of the indices and models for reservoirs should be used with the guidance of experts, as the specific conditions of a reservoir can greatly affect the trophic state of a reservoir (ICOLD 1981, ICOLD 1991 17th Congress).

Large quantities of available phosphorus and nitrogen are the prime agents responsible for triggering the eutrophication process. This phenomenon is found particularly in relatively recent impoundments in tropical regions. The decomposition of organic matter following flooding of a reservoir, to which is added the use of fertilizers and detergents, and the waste water associated with industrialization and urbanization, are the major causes of the greater availability of nutrients.

Such tropical lakes as Lake Volta (Ghana), Kariba Lake (Zambia and Zimbabwe) and Lake Brokopondo (Surinam) are typical cases of *eutrophication*.

The first symptoms are overproduction of *macrophytes*, algae and suspended micro-organisms, decreasing the transparency of the water. Then comes the massive formation of putrescible plant and animal matter which is deposited together with the dead algae on the bottom of the water body. This leads to a very large demand for oxygen which may even lead to *anaerobia* of the bottom water layers with subsequent release of hydrogen sulphide and free iron, manganese and ammonium ions, and formation of layers of gas.

Abundance of methane, ethane and acids (together with the organic materials) may give rise both to compounds of chlorine (trialomethanes) and to the growth of toxic algae in the chlorination process of a purification plant, thus endangering the population and livestock.

These impacts affect the way the water is used such as for domestic and industrial use (unpleasant tastes and odours, clogging of water intake filters, increased corrosion due to free ions, etc.), recreational use such as swimming (possible skin irritations) and boating (difficulty sailing because of the luxuriance of algae and vegetation). Recreational and commercial fishing may also suffer, since the deterioration in water quality is such that only highly tolerant fish species can survive and develop.

Mesures d'atténuation

Le contrôle du temps de séjour par des méthodes opérationnelles (au barrage ou à l'évacuateur de crue), de même que le réglage et le positionnement du niveau d'évacuation d'eau, sont des techniques fiables qu'on peut utiliser comme mesures d'atténuation pour prévenir l'eutrophisation et la prolifération d'algues.

Lorsque les activités agricoles dans le bassin hydrographique sont la cause principale de la présence d'éléments nutritifs dans un réservoir, de meilleures pratiques de gestion contribueront grandement à diminuer la quantité de substances nutritives.

d) Santé publique (spécialement dans les régions tropicales)

Effets

L'abondance de végétaux et d'algues a aussi un effet direct sur la santé des riverains à cause de l'augmentation de la quantité de foyers propices au développement d'organismes porteurs de maladies. La maladie la plus courante des régions tropicales est la bilharziose (ou schistosomiase) qui provient d'un escargot qu'on retrouve dans la végétation aquatique, en eau calme et chaude, parasité par des larves de trématodes qui, à leur tour, pénètrent dans le corps humain exposé à l'eau. Un réservoir *eutrophe* peut aussi contribuer à favoriser d'autres maladies qui ne requièrent pas d'hôtes intermédiaires, comme l'amibiase, la fièvre typhoïde et les entéro-infections. Parmi les autres maladies courantes dues à la présence d'un réservoir, mentionnons le paludisme, transmis par un moustique (anophèle) qui se développe aux abords des réservoirs (dans les petites mares et les zones marécageuses) et de leurs systèmes hydrologiques secondaires, et l'onchocercose, dont l'agent pathogène est une petite mouche (simuliidae) qui croît dans les eaux rapides, par exemple sur les bords des déversoirs et des canaux de fuite.

Mesures d'atténuation

Voici des exemples de mesures d'atténuation qui doivent être mises en œuvre dans les régions tropicales, où les effets sur la santé ne doivent pas être négligés :

- 1° constitution d'un comité de consultation sur la santé et de services d'aide en matière de santé;
- 2° mise en œuvre d'un programme d'information à l'intention de la population locale;
- 3° élaboration d'un programme de surveillance de la retenue et de suivi de la population;
- 4° déboisement des futures rives avant la mise en eau et mesures contre la croissance des algues et de la végétation riveraine;
- 5° élimination des mares par drainage, remplissage ou approfondissement;
- 6° variations du niveau de l'eau durant la saison de reproduction des hôtes;
- 7° lutte contre les organismes porteurs de maladies par l'utilisation de pesticides non toxiques pour les humains, les poissons et le bétail.

Mitigation

Control of residence time by operational procedures (at the dam or at the spillway), regulation and positioning of the outlet level are reliable techniques to be used for mitigation measures to prevent eutrophication and algal blooms.

When the major source of nutrients into a reservoir comes from agricultural activities in the watershed, the use of best management practices can drastically decrease the nutrient load.

d) Public Health (particular in tropical areas)

Effects

The abundance of plants and algae also acts directly on the health of people living nearby through the increase in the number of sites favourable to the development of disease-bearing organisms. The most common disease in tropical areas is : bilharzia (or schistosomiasis), which originates in a water snail that is found in warm, calm water in aquatic vegetation, and on which fluke larvae live as parasites, in turn penetrating the human body as it is exposed to the water. A *eutrophic* reservoir may also contribute toward encouraging other diseases which require no intermediary hosts, such as amoebiasis, typhoid fever and entero-infections. Other common diseases related to the presence of reservoirs are malaria, carried by a mosquito (anophele) which breeds and grows on the edges of reservoirs (small puddles and swampy areas) and their secondary hydrological systems, and onchocerciasis, whose pathogenic agent is a small fly (simuliidae) which develops in fast-moving water, for instance on the edges of weirs and tailraces.

Mitigation

In tropical areas, where health effects are a major issue, mitigation measures must be implemented. The following are some examples of such means :

- 1) Promotion of a health advisory committee and support health services.
- 2) Implementation of an information programme for the local population.
- 3) Elaboration of a monitoring program for the impoundment and the population.
- 4) Clearing of future shoreline before flooding and control of algae growth and riparian vegetation.
- 5) Elimination of pool or shallow areas by draining, filling or deepening.
- 6) Water level fluctuations during host reproduction season.
- 7) Control of disease-bearing organisms by the use of pesticides that are non-toxic for humans, fish and livestock.

3.2. EN AVAL DES RETENUES

La qualité de l'eau en aval d'une retenue dépend directement des propriétés physico-chimiques de l'eau de la retenue, du niveau des conduites forcées, des utilisations de l'eau, du régime d'écoulement, de la capacité de récupération du cours d'eau et, dans certains cas, de l'évacuation des sédiments, surtout lorsque les apports au cours d'eau résiduel sont peu importants.

Pour tout réservoir et quel qu'en soit l'emplacement, le type d'utilisation de l'eau et les paramètres écologiques en aval déterminent la qualité d'eau requise. La conception et la gestion du réservoir doivent intégrer des mesures pour assurer cette qualité.

3.2.1. Propriétés physiques

a) Effets

La décantation des particules en suspension dans la retenue peut contribuer à diminuer la turbidité de l'eau et à en améliorer la transparence dans le cours aval, ce qui profite aux prises d'eau domestique. Cependant, l'eau évacuée est « avide » de sédiments, ce qui provoque une certaine érosion du lit et des berges de la rivière à l'aval.

La diminution du transport de particules en suspension peut avoir des effets négatifs sur certains organismes vivant en aval, effets qui peuvent se faire sentir jusqu'à l'embouchure de la rivière. C'est ainsi qu'on a noté une diminution de la pêche sardinière dans la Méditerranée, à l'embouchure du Nil, après la construction du barrage d'Assouan (CIGB, 1993). Étant donné que les terres agricoles en bordure du Nil ne sont plus inondées durant la saison des pluies, on constate un appauvrissement du sol, que les fermiers doivent compenser par l'utilisation de fertilisants.

Par ailleurs, l'importante érosion des berges du substratum meuble, qui suit la mise en eau d'un réservoir, peut provoquer une telle concentration de sédiments en suspension qu'il en résulte une augmentation de la charge transportée en aval, comme ce fut le cas, par exemple, au lac Southern Indian, au nord du Manitoba (Canada).

À la différence de ce qui se produit dans les lacs naturels, les eaux de l'hypolimnion, évacuées par des conduites profondes, sont généralement plus chaudes en hiver et plus froides en été, ce qui crée des systèmes complexes de courants horizontaux. En effet, si l'eau de l'écoulement naturel du cours d'eau à l'aval du barrage est plus chaude et plus riche en matières en suspension que l'eau du réservoir, il ne peut y avoir de mélange entre ces eaux de densités différentes et ce, sur une distance considérable (Tennessee Valley Authority). Toutefois, la sédimentation est toujours possible.

De plus, s'il y a stratification thermique dans un réservoir muni de prises d'eau profondes au niveau de l'hypolimnion, la température de l'eau soutirée est plus froide, ce qui peut être avantageux pour les prises d'eau industrielle et d'eau potable, ou même pour les espèces de poisson frayant à la fin de la saison chaude. Dans certains cas, l'eau plus froide freine la pratique de la pêche en aval.

3.2. DOWNSTREAM OF IMPOUNDMENTS

The water quality below the impoundment depends directly on the physical and chemical properties of the water in the impoundment, the level of its penstocks, water uses, flow regime, river recovery capacity and in some cases sediment flushing, especially if the residual watercourse receives little other water.

For all reservoirs, whatever their location, the type of water use and the ecological parameters below the reservoir determine the water quality required. The reservoir design and management should establish the measures to be taken to provide this quality.

3.2.1. Physical Properties

a) Effects

The settling out of suspended particles in the impoundment may contribute to lowering the turbidity of the water and enhancing its transparency in the downstream section, entailing a beneficial effect particularly for domestic intakes. However the water released downstream is "hungry" for sediment and this results in some scouring of the bed and banks.

This decrease in transported suspended particles may have negative effects for some of the organisms living downstream. This effect may prevail as far as to the mouth of the river. A decline in sardine fishing was thus observed in the Mediterranean at the mouth of the Nile following the construction of the Aswan dam (ICOLD, 1993). Since the farm-land on the borders of the Nile is no longer flooded in the wet season, there is a lack of fertile soil input and the farmers have to compensate for this by using fertilizers.

Substantial erosion of the banks of loose substrate following the flooding of a reservoir may induce, on the other hand, such a concentration of suspended sediment that it increases the load conveyed downstream, as was the case for instance at Southern Indian Lake in Northern Manitoba (Canada).

Unlike in natural lakes, water from the hypolimnion released through deep penstocks is generally warmer in winter and colder in summer, and this creates complex systems of horizontal currents. Indeed, if the natural inflow into the stream below the dam is warmer and richer in suspended materials than the water from the reservoir, there can be no mixing between these waters of different densities for a considerable distance (Tennessee Valley Authority). Sedimentation, however, always takes place.

In addition, if there is thermal stratification in a reservoir with deep penstocks at the hypolimnion level, the temperature of the water drawn from there is colder, and this may be advantageous for industrial and drinking water supplies, or even for fish species spawning at the end of the warm season. In some cases the cooler water interferes with the downstream fishery.

Une étude menée sur la rivière Grand, au sud de l'Ontario (Canada), a permis de constater une réduction de la diversité piscicole, à l'aval de la retenue, en raison de l'eau plus froide évacuée. Dans les cours d'eau plus chauds de la Tennessee Valley Authority, un tel refroidissement a cependant favorisé le développement de populations de salmonidés beaucoup plus intéressantes sur le plan halieutique. Ce genre de résultats semble néanmoins peu probable dans les cours d'eau plus froids du nord.

S'il n'y a pas de stratification thermique dans le réservoir et si le temps de séjour est long, l'eau peut être évacuée en aval à des températures plus élevées, ce qui peut causer des problèmes à l'échelle locale à cause de la faible teneur en oxygène dissous et des changements subséquents dans la composition et la productivité des espèces.

Les effets biologiques liés aux nouvelles températures de l'eau et aux variations de débit en aval sont souvent difficiles à cerner, spécialement aux niveaux trophiques inférieurs. Toutefois, la synthèse de 13 études nord-américaines sur l'effet du débit a permis de montrer une diminution générale de la diversité des espèces et une augmentation de la population absolue.

Par ailleurs, une diminution de la diversité et de la biomasse des larves d'insecte a été constatée dans la rivière South Saskatchewan, sur 110 km en aval du lac Diefenbaker (Canada), à cause de l'effet de refroidissement dû à l'eau provenant de l'hypolimnion. La température de l'eau a en effet beaucoup d'influence sur le déclenchement des diverses étapes de métamorphose, ce qui rend beaucoup d'insectes vulnérables aux modifications thermiques. De plus, la question a une importance pratique puisque bon nombre de ces espèces constituent une source importante de nourriture pour les poissons.

b) Mesures d'atténuation

Des prises d'eau à divers niveaux peuvent contribuer à améliorer la qualité de l'eau à l'aval et à contrôler la température de l'eau en fonction des besoins en aval. La gestion devrait conduire à un régime thermique aussi proche que possible des variations naturelles.

Toutes mesures qui réduisent la stratification dans le réservoir, incluant le brassage local, sont en général bénéfiques.

3.2.2. Propriétés chimiques

a) Effets

Le prélèvement d'eau de l'hypolimnion souvent déficitaire en oxygène dissous à certaines périodes de l'année peut avoir un impact en aval, à moins d'une réoxygénation naturelle, surtout chez les espèces aquatiques sensibles, telles que les salmonidés. L'appauvrissement en oxygène et l'augmentation subséquente de la concentration d'éléments chimiques réduits, tels que les ions manganés et les sulfures, peuvent rendre l'eau provenant de l'hypolimnion dangereuse pour la vie en aval, particulièrement dans les frayères, où ces éléments chimiques et une eau froide augmentent les risques d'infection chez les alevins. Ce problème devient particulièrement sérieux si la réoxygénation des eaux en aval ne s'effectue pas rapidement, retardant ainsi la précipitation des substances toxiques.

A study on the Grand River in southern Ontario (Canada) nonetheless showed a reduction in the diversity of fish below the impoundment associated with the cooler temperature of the water discharged. In the warmer streams of the Tennessee Valley Authority, however, such a cooling favoured the development of salmonid populations that are much more attractive in terms of fishing. Benefits of this kind appear unlikely in the colder northern streams, though.

If there is no thermal stratification in the reservoir and its residence time is high, then water at higher temperatures may be discharged downstream, leading to potential local problems with low contents of dissolved oxygen and subsequent changes in species composition and productivity.

The biological effects associated with new water temperatures and variations in downstream flow are often difficult to define, particularly at the lower trophic levels. Thus, a synthesis of 13 North American studies on the effect of flow showed a general decrease in the variety of species, but an increase in the absolute population.

Moreover, a decrease in the variety and biomass of insect larvae was noted in the South Saskatchewan River as far as 110 km below Lake Diefenbaker (Canada), associated with the effect of flow from the hypolimnion. In this case the water temperature did in fact considerably affect the triggering of the various stages of metamorphosis, and this made many insects vulnerable to thermal changes. The question also has a practical significance, since a good many of these species are an important source of food for fish.

b) Mitigation

Offtakes at various levels can help improve the water quality downstream and allow for flexibility and control of the water temperature in accordance with downstream needs. Management should result in a thermal regime as similar as possible to the natural variability.

Any measure which reduces reservoir stratification, including local mixing, are generally beneficial.

3.2.2. Chemical Properties

a) Effects

Drawing off water from the hypolimnion, where the dissolved oxygen is often depleted at certain times of year, can have an impact downstream unless there is natural reoxygenation, especially on susceptible aquatic species, such as salmonids. In this case, oxygen depletion and the subsequent increase in concentrations of reduced chemical elements, such as manganous ions and sulphurs, can make the water from the hypolimnion dangerous for life downstream, particularly at spawning sites, where these chemical elements and cold water increase the risk of infection in small fry. This problem becomes especially serious if the reoxygenation of downstream water does not occur quickly thus delaying the precipitation of toxic substances.

Selon la topographie du cours d'eau aval, l'eau peut parcourir plusieurs kilomètres avant de se réoxygéner, comme c'est le cas aux réservoirs de la Tennessee Valley Authority (États-Unis). Encore une fois, des prises d'eau à différents niveaux peuvent permettre de contrôler la qualité de l'eau en fonction des besoins en aval. Des évacuations par robinets-vannes Howell Bunger ont un effet similaire.

L'utilisation d'un évacuateur de crue à forte dénivellation peut provoquer, à l'aval immédiat de l'ouvrage, une sursaturation de l'eau en azote et en oxygène et causer la mort des poissons dans cette zone, surtout ceux pourvus d'une vessie natatoire. En 1970, par exemple, dans le fleuve Columbia, une grande proportion de jeunes saumons, lors de leur première migration vers la mer, sont morts des suites d'une maladie gazeuse. On peut résoudre ce problème par une exploitation appropriée de l'évacuateur de crue et de la centrale, pendant les périodes où les poissons séjournent dans cette zone. Une autre mesure consiste à atténuer la pente de l'évacuateur de crue. L'installation et l'exploitation de passes à poissons bien conçues (échelles, écluses, etc.) devront tenir compte de tous ces facteurs.

Il est à noter que la réduction du débit aux ouvrages de réglage à certaines périodes peut diminuer le pouvoir de dilution des eaux de qualité médiocre évacuées en aval, et augmenter d'autant les problèmes dont il a été question précédemment. Inversement, dans les régions arides et chaudes, les débits à la fin de l'hiver et au printemps sont en général élevés et l'eau est de bonne qualité. Les débits naturels à la fin de l'été et à l'automne y sont faibles et l'eau est de mauvaise qualité; durant ces saisons, une retenue peut permettre un débit acceptable d'eau de bonne qualité.

b) Mesures d'atténuation

On peut envisager deux catégories de mesures d'atténuation. Les premières améliorent la qualité de l'eau dans la retenue. Il en a déjà été question précédemment.

Les secondes améliorent la qualité de l'eau évacuée. On peut envisager de prélever l'eau de façon sélective des réservoirs munis d'ouvrages d'évacuation à niveaux multiples, d'améliorer la qualité de l'eau évacuée par réaération ou de modifier les ouvrages d'évacuation qui causent une sursaturation en azote ou en oxygène. On peut aussi utiliser différents procédés opérationnels pour gérer l'eau du réservoir et du bassin fluvial afin d'évacuer une eau de meilleure qualité.

3.2.3. Estuaire

a) Effets

La quantité de sédiments transportés vers l'estuaire et les plages côtières par suite de la construction d'un barrage sur un cours d'eau et du remplissage de la retenue dépend du volume de sédiments captés. En Malaisie, des observations et des études environnementales ont permis de constater l'érosion côtière d'un estuaire, ce qui coïncidait avec la construction d'un barrage. Il a toutefois été impossible de conclure que ce phénomène était causé par le barrage.

Sur la Grande Rivière (Baie James, Canada), même si le débit est maintenant cinq ou six fois plus important qu'il ne l'était auparavant durant l'hiver, on n'a

Depending on the topography of the downstream watercourse, it may take several kilometers before the water is reoxygenated, as is the case for the reservoirs of the Tennessee Valley Authority (USA). Once again, offtakes at different levels can allow for control of water quality for downstream needs. Some releases through Howell-Bunger cone valves have a similar effect.

The use of steep spillways can generate supersaturation of the water with nitrogen and oxygen immediately below a dam, and may be fatal for fish in this sector, particularly those with a swim bladder. In 1970 for instance, on the Columbia River a large proportion of the young salmon, on their first migration to the sea, died from gas bubble disease. This problem can be resolved by appropriate management of the spillway and power station, during the periods when the fish stay in this sector. Another measure is to reduce the gradient of the spillway. Installation and management of properly designed fish passes (ladders, locks, etc.) should take into account all these factors.

Note that the reduced flow at regulatory works at certain times may diminish the power of dilution of poor quality water discharged downstream and increase the problems mentioned accordingly. Conversely in hot arid regions, normally the late winter and spring flows are high with good quality water. Natural late summer and autumn flows are low with poor quality water and during these seasons an impoundment can provide reasonable flows of good quality.

b) Mitigation

Mitigation measures fall into two categories. The first comprises those which improve the quality of the water in the impoundment. These have been discussed in the previous section.

The second category includes measures which can be taken to improve the quality of the water as it is released. This may involve the selective withdrawal of waters of the desired quality from the reservoir with multilevel outlet works, the improvement of the quality released through reaeration, or the correction of outlet works which cause nitrogen/oxygen supersaturation. Sometimes, operational schemes can be used to manage the water in the reservoir and the river basin so as to release waters of better quality.

3.2.3. Estuary

a) Effects

The amount of sediment transported to estuaries and coastal beaches following the damming of streams and filling of the reservoir is related to the volume of sediment trapped. In Malaysia, environmental studies and observations noted coastal erosion at an estuary that coincided with the construction of a dam. However, whether the results were due to the dam is inconclusive.

In La Grande River (James Bay, Canada), even though the flow was increased five to six times, compared to the natural conditions (during the winter), no nega-

observé aucun impact négatif sur les habitats côtiers, grâce à la protection assurée par la couche de glace et à l'adaptation des espèces aux variations saisonnières de salinité.

De plus, la régularisation à long terme du débit et ses variations à court terme peuvent influencer la flore et la faune d'un estuaire, à cause de l'évolution du front salin et du mélange des eaux. Les effets biologiques sont toutefois très difficiles à évaluer, étant donné les nombreux paramètres qui interviennent (courants, niveaux, marées, vents, etc.) et les changements de débit.

On suppose que la régularisation du fleuve Fraser a probablement été néfaste aux jeunes saumons dans le détroit de Géorgie (Colombie Britannique, Canada), tandis que les effets sur les salmonidés ont été jugés négligeables dans l'estuaire de la Grande Rivière et dans le fleuve Koksoak après l'aménagement hydroélectrique de la Baie James (Québec, Canada).

La création d'un réservoir près d'un estuaire peut avoir des effets bénéfiques sur ce dernier. Au lac Ponte Liscione (Italie), le réservoir sert de trappe pour les éléments nutritifs et de digesteur artificiel, transformant l'estuaire en oasis pour la faune et la flore. On doit, dans ce cas, résoudre le problème de l'eutrophisation dans le réservoir; non seulement les eaux traitées et non traitées y sont-elles évacuées, mais il en est de même pour les eaux usées provenant de l'irrigation et du drainage naturel, ce qui est difficile à contrôler à la source.

tive impacts were noted on coastal habitats, because of the protection provided by ice cover and because species were adapted to seasonal variations of salinity.

Moreover, the long-term regulation of flow and its short-term fluctuations can influence the flora and fauna of an estuary due to changes in the salt-water front and the mix of water. The biological effects are, however, very difficult to assess given the many parameters in play besides the discharge changes (currents, water levels, tides, winds, etc.).

It is assumed that the regulation of the Fraser River was probably deleterious for young salmon in the Strait of Georgia (British Columbia, Canada), whereas the effects on salmonids were judged negligible in the estuary of La Grande River and in the Koksoak river following the James Bay hydroelectric project (Québec, Canada).

Beneficial effects on the estuaries of rivers can be observed after the creation of a reservoir near the point where the river empties into the sea. In Ponte Liscione Lake (in Italy), the reservoir acts as a trap for nutrients and as an artificial digester, transforming the estuary into an oasis for fauna and flora. In this case, the problem of eutrophication must be resolved in the reservoir; not only does treated and non-treated water flow into the reservoir, but also waste water from irrigation and water from natural drainage, which is difficult to control at the source.

4. CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Si les phénomènes climatiques (tels que les effets du vent, des précipitations et de la température de l'air sur les courants, la stratification thermique et l'érosion des berges) qui influencent les grandes retenues d'eau sont relativement bien connus, l'influence d'une masse d'eau sur le climat est difficile à circonscrire.

Il convient d'abord de souligner que seuls les projets récents de création de retenues, qui ont fait l'objet d'études d'impact détaillées (une quinzaine environ), se sont intéressés à l'aspect climatique avant la mise en eau du réservoir, avec établissement de prévisions d'impact, et ont prévu un programme de suivi environnemental. Pour ce qui est des réservoirs plus anciens, on a recueilli des données climatiques seulement après l'achèvement des travaux, ce qui rend hasardeuse toute comparaison avec des données antérieures.

Il faut également mentionner que les modifications climatiques causées par un réservoir sont tellement minimes qu'il est difficile de faire la différence entre les effets de la présence de la retenue et le climat complexe de la région et ses fluctuations normales. Les effets d'une retenue dépendent de ses dimensions, de la topographie et du climat naturel.

Par ailleurs, beaucoup plus d'études climatiques ont été consacrées aux lacs naturels (aux Grands Lacs, par exemple) qu'aux retenues. De plus, chaque site étudié est unique, et il est dangereux d'appliquer à d'autres projets des résultats spécifiques à un site.

Quoi qu'il en soit, le présent chapitre résume les principaux changements climatiques qu'une masse d'eau importante, telle une retenue, peut provoquer. De façon générale, une masse d'eau agit sur le climat de l'une ou l'autre des façons suivantes :

- 1) diminution de l'albédo régional, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie absorbée à la surface;
- 2) interaction des températures de l'eau et de l'air;
- 3) augmentation de l'effet éolien à cause de l'atténuation du relief;
- 4) changements dans l'évapotranspiration;

le tout en rapport avec la superficie et le volume de la retenue (Fig. 6).

On peut résumer ces observations générales comme suit :

- les impacts climatiques sont de petite échelle (de 0 à 50 km), approchant parfois l'échelle moyenne (de 50 à 150 km);
- les effets saisonniers sont plus prononcés que les effets annuels;
- un petit réservoir situé à haute altitude et/ou dans une région très humide, avec fortes précipitations, a un effet climatique négligeable;

4. CLIMATIC CHANGES

While the climatic features which influence large water bodies are quite well known, such as the effect of wind, precipitation and air temperature on currents, thermal stratification and bank erosion, the influence of a water body on the climate is hard to pinpoint.

It should first be stressed that only recent impoundment projects, which have been the subject of detailed impact studies (some fifteen), have dealt with the climatic aspect before the flooding of the reservoir, with impact forecasts, and subsequent monitoring. In the case of older reservoirs, climatic data were taken only after the project was completed, so any comparison with previous conditions is hazardous.

It should also be mentioned that the climatic changes caused by a reservoir are so minimal that it is hard to distinguish the specific impact associated with the presence of the water body from the region's complex weather system and its normal fluctuations. The effects of a reservoir vary with its dimensions, topography and natural climate.

Moreover, climatic studies are much more numerous for natural lakes (Great Lakes, for instance) than for reservoirs. Furthermore, each site studied is distinctive, and it is dangerous to use these specific findings as the basis for other projects.

However this may be, the following chapter summarizes the main climatic changes that can be induced by a major body of water such as an impoundment. Generally speaking, this water body acts on the climate :

- 1) Through reduction of regional albedo increasing thus the energy absorbed at the surface,
- 2) Through the interaction of water and air temperatures,
- 3) Through the increased effect of the wind due to the flatter surface,
- 4) Through changes in *evapotranspiration*,

all in relation to the surface area and volume of the water body (Fig. 6).

General observations can be summarized as :

- the climatic effects are of the micro-scale (0 to 50 km), sometimes bordering on the meso-scale (50 to 150 km);
- the seasonal impacts are more marked than annual impacts;
- a small reservoir at high altitude and / or where there is high humidity and precipitation have a negligible climatic effect;

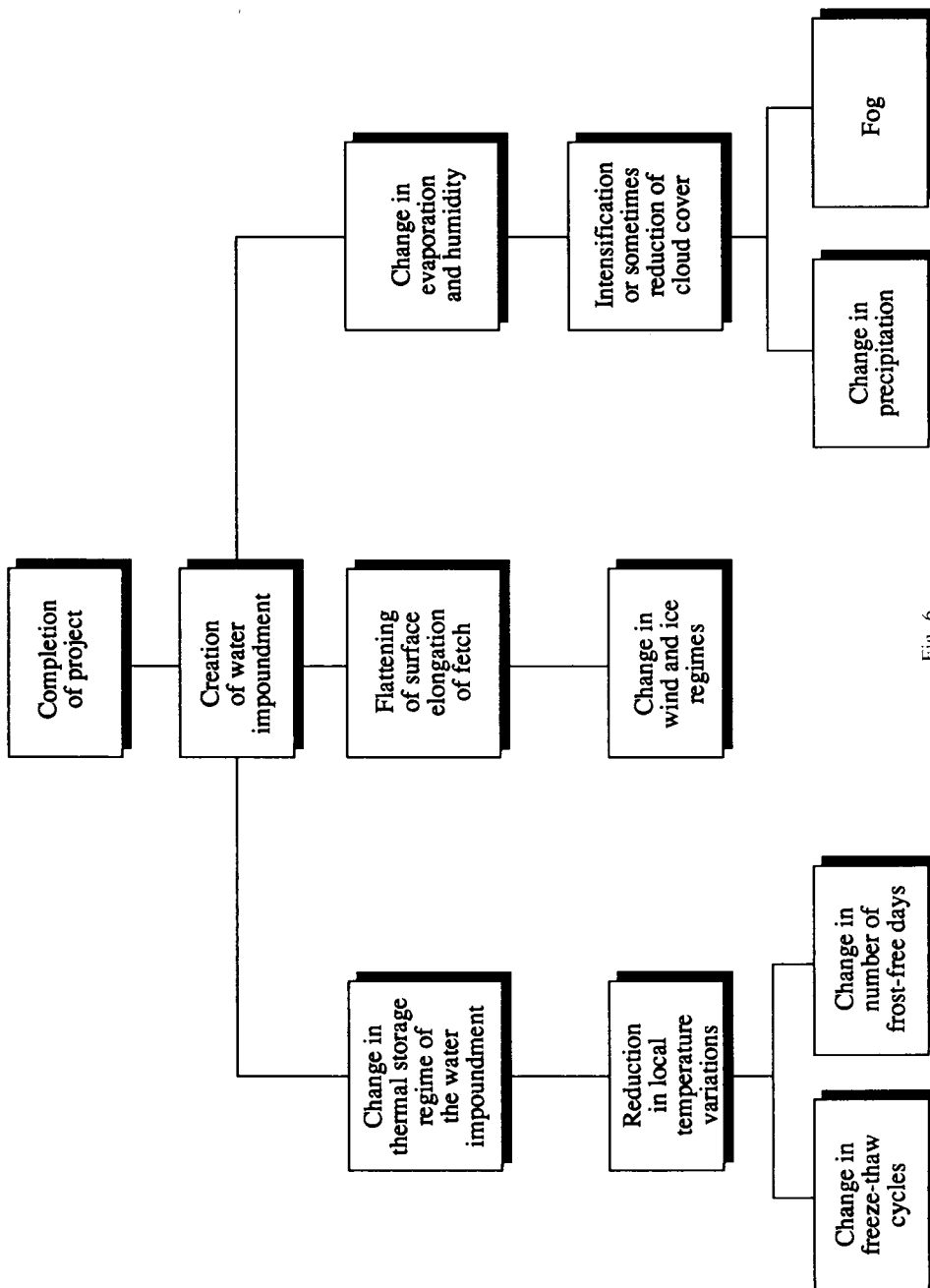


Fig. 6

Effets potentiels d'une retenue sur le climat, dans une région septentrionale tempérée

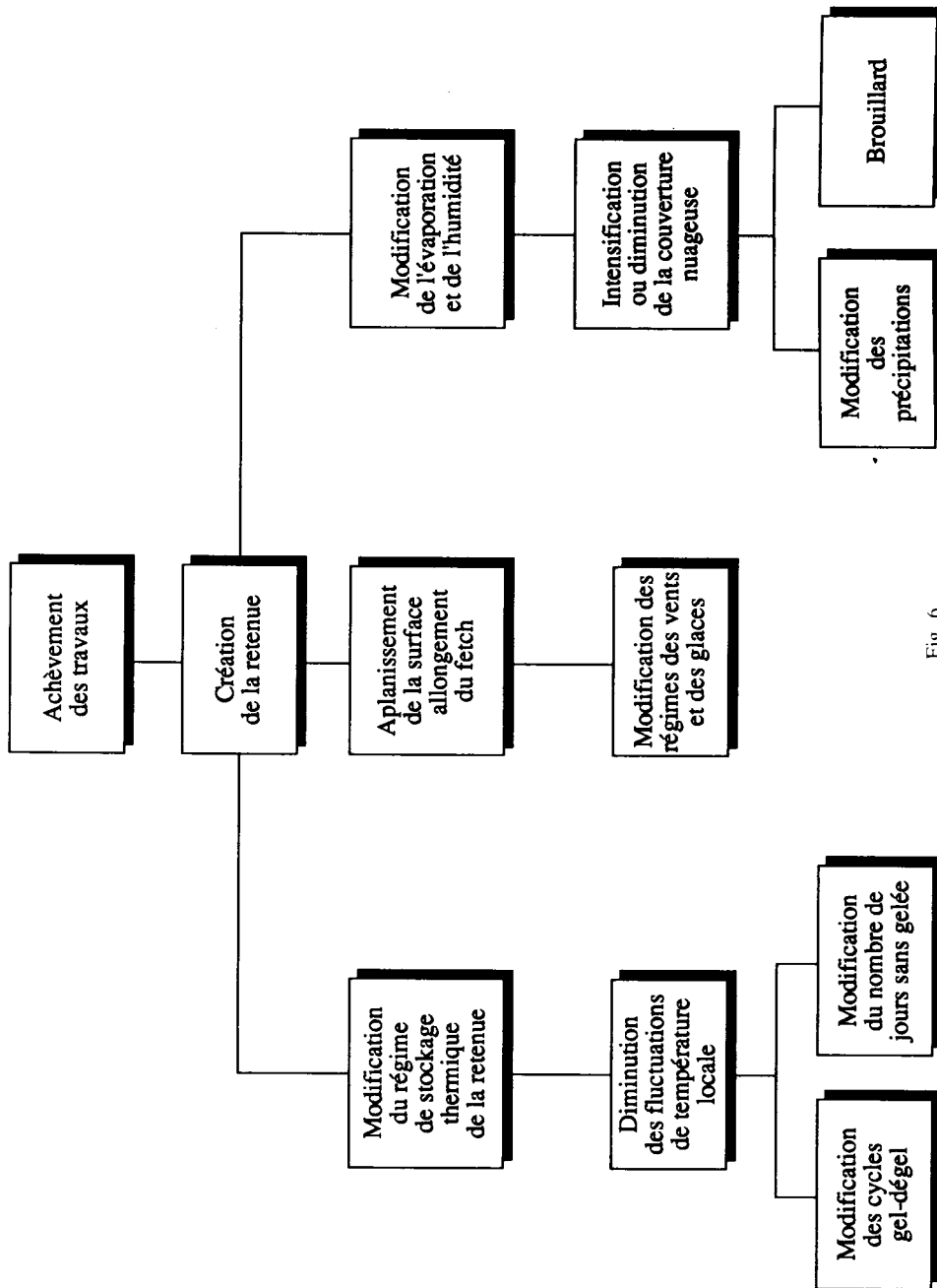


Fig. 6

Potential Impacts of a Northern Temperate Reservoir on Climate

- les répercussions saisonnières et annuelles des très petites retenues sur la température, le vent et les précipitations sont négligeables au-delà d'un rayon de 20 km;

- les moyens et les grands réservoirs (de 600 à 2 000 km²) ont une zone d'influence maximale sur le vent de 15 à 50 km dans l'axe du fetch maximal;

- les très grands réservoirs (4 500 km² et plus) peuvent avoir une zone d'influence épisodique sur le vent et les précipitations de 40 à 50 km.

La seule mesure d'atténuation connue consiste à maintenir un milieu forestier autour de la retenue.

Un exemple particulier, la retenue de Tarbela au Pakistan, est donné ci-après.

Malgré le volume important de la retenue, celui-ci est faible par rapport aux apports annuels : dans les meilleures conditions, seuls 15 % de ceux-ci y sont stockés. Les effets de la retenue de Tarbela sur le climat local ont été étudiés en analysant les données hydro-météorologiques couvrant une période de 30 années : environ 15 années avant la création de la retenue et 15 années après. La hauteur moyenne annuelle des pluies était de 762 mm avant l'existence de la retenue et passa à 1 016 mm après le remplissage.

Malgré l'augmentation de la hauteur pluviométrique moyenne, les températures n'ont généralement pas changé. Les 30 années d'observations indiquent que les températures maximales n'ont pas changé, les températures minimales ayant baissé d'environ 0,6 °C, en moyenne, après le remplissage de la retenue.

L'augmentation de la pluviométrie moyenne après la création du réservoir a eu des répercussions sur le niveau d'humidité. Il y a eu une augmentation globale de l'humidité mensuelle moyenne de 10 % dans la période suivant la mise en eau.

L'évaporation annuelle, qui se situait entre 2 490 mm et 2 997 mm avant la retenue fut réduite à 1 778-1 980 mm après le remplissage. La réduction de l'évaporation a eu un effet positif, les pertes d'eau du réservoir ayant été plus faibles que prévu.

4.1. MÉTHODES D'ÉVALUATION

Il existe, en général, deux méthodes principales pour analyser l'influence d'une masse d'eau :

(1) l'étude directe au moyen d'observations (mesures à échelle moyenne et analyse statistique);

(2) l'étude indirecte : prévisions des influences grâce aux données provenant d'autres réservoirs.

4.1.1. Observations

Pour les lacs de toutes dimensions, tant naturels qu'artificiels, la méthode la plus répandue consiste à analyser les données de stations météorologiques au sol, à

- the annual and seasonal effects of very small reservoirs on temperature, wind and precipitation are insignificant beyond a radius of 20 km;

- the medium and large size reservoirs (600 to 2 000 km²) have a maximum influence zone of 15 to 50 km for wind along the maximum fetches;

- the very large reservoirs (4 500 km² and over) may have an episodic influence zone of 40 to 50 km for wind and precipitation.

The only known mitigation measure is maintaining forest around the impoundment.

A specific example for the Tarbela reservoir in Pakistan is quoted as follows.

Although large in volume the storage capacity of the reservoir is still small compared to annual inflow of which only at best 15 % is stored. The effects of Tarbela reservoir on local climate has been assessed by analysing 30 years of hydro-meteorological data covering some 15 years of data prior to construction of the reservoir and about the same period thereafter. The average annual rainfall was 762 mm during the pre-impoundment period which increased to 1 016 mm after the impoundment.

Though there has been an increase in the average rainfall, the temperatures generally remained unchanged. The 30 years of record indicate that maximum temperatures remained unchanged both prior to and post-impoundment whereas in the case of minimum temperatures there has been a drop of about 0.6 °C on average after the impoundment of the reservoir.

The increase in average annual rainfall after the construction of the reservoir has affected the level of humidity. There has been an overall increase in the monthly average humidity by 10 % in the post-impoundment period.

Prior to impoundment, the annual evaporation ranged between 2 490 mm and 2 997 mm which reduced to 1 778 mm to 1 980 mm after the impoundment. The reduction in evaporation has contributed positively and overall reservoir storage losses are less than those originally estimated.

4.1. EVALUATION METHODS

Overall, there are two main approaches to analyzing the influence of a water body :

- 1) direct studies by observations (mesoscale measurements and by statistical analysis);

- 2) indirect studies; impact forecasts with help of data from other reservoirs.

4.1.1. Observations

The most widespread method, for lakes of all sizes, both natural and man-made, is to analyze data from land weather stations, from a regular network or a

partir d'un réseau ordinaire ou d'un réseau spécial où les stations sont disposées de façon à définir avec précision la zone d'influence climatique. Cette technique a été utilisée notamment aux réservoirs Rybinsk et Tsimlyansk (ancienne URSS), et au lac Balaton (Hongrie).

On peut également installer des détecteurs thermiques sur un avion afin d'obtenir une représentation instantanée d'une situation donnée. Très utile, entre autres, pour préciser les variations spatiales de température, cette technique est néanmoins coûteuse et, à l'inverse des réseaux de stations fixes, elle ne permet pas de faire une évaluation temporelle. Les petits réservoirs Pakowski, Newell et St. Mary en Alberta (Canada) ont été étudiés de cette façon.

Par ailleurs, on a utilisé des radars météorologiques pour étudier les précipitations nivales provoquées par le lac Érié. Des relevés provenant de navires météorologiques, associés à des données de stations riveraines, ont aussi été utiles pour étudier l'humidité, la tension de vapeur et les vents sur les Grands Lacs (Canada).

Enfin, les lacs artificiels Nasser (Égypte), Volta (Ghana) et Kariba (Zambie) ont été suivis par télédétection.

4.1.2. Prévision des influences

La méthode des analogies géographiques consiste à prendre les résultats climatiques relatifs à un réservoir et à les appliquer à un autre projet. Ainsi, on s'est servi des influences climatiques observées au réservoir Rybinsk pour prévoir les impacts potentiels du complexe Pechora-Vycheгда-Kama et du projet Ob en Sibérie. De telles prévisions sont toutefois générales et doivent être interprétées avec beaucoup de précaution, étant donné la complexité des interactions climatiques avec le relief et les conditions locales propres à chaque étendue d'eau.

Les modèles mathématiques sont des outils très prometteurs et de plus en plus utilisés pour prévoir l'interaction des lacs artificiels avec l'atmosphère. Étant donné qu'elles permettent d'intégrer de nombreux paramètres et de simuler différents scénarios, ces méthodes sont considérées comme les plus valables à ce jour quant à la précision des prévisions. L'utilisation combinée des connaissances générales, des données recueillies sur le terrain et des modèles appropriés est également possible et donne des résultats plus précis.

4.2. INFLUENCES SUR LA TEMPÉRATURE

De façon générale, la capacité calorifique d'une masse d'eau est proportionnelle à l'importance de cette masse. La masse d'eau a pour effet d'atténuer les variations de température locale en refroidissant l'air au printemps et en été, et en le réchauffant à l'automne et au début de l'hiver. On peut également observer un réchauffement de l'air la nuit et un refroidissement le jour.

Des études réalisées au réservoir Rybinsk illustrent bien cette théorie. On a, en effet, noté une diminution de 3 °C de la variation *diurne* en début d'été et un réchauffement des températures nocturnes de 3 à 4 °C, de juin à la prise des glaces, comparativement aux températures enregistrées aux stations situées plus loin à l'intérieur des terres, ce qui confirme l'influence locale du réservoir.

special arrangement of sources which allow the zone of climatic influence to be defined quite accurately. This technique was used in particular for the Rybinsk and Tsimlyansk Reservoirs (USSR) and Lake Balaton (Hungary).

Thermal sensors can also be installed on aircraft, for an instantaneous picture of a given situation. While very useful among other things for defining spatial variation in temperature, this technique is nonetheless costly and does not allow for assessment over time, as does a fixed station network (the small Pakowski, Newell and St. Mary Reservoirs in Alberta (Canada) were investigated in this way).

Weather radar has been used to study nival precipitation due to the impact of Lake Erie. Surveys from weather ships, combined with data from lakeshore stations, have also been useful for humidity, vapour pressure and wind studies on the Great Lakes (Canada).

Finally, the effect of man-made Lakes Nasser (Egypt), Volta (Ghana) and Kariba (Zambia) were followed by means of remote sensing.

4.1.2. Impact Forecasts

The method of geographic analogues involves applying the climatic findings from one reservoir to another project. In this way, the climatic influence observed at the Rybinsk Reservoir was used to forecast the potential impact of the Pechora-Vychegda-Kama complex and the Ob project in Siberia. But such forecasts are general and must be interpreted very cautiously, given the complexity of the climatic interactions with the landform and the local conditions specific to each stretch of water.

Mathematical models are very promising tools that are increasingly used to forecast the interactions of man-made lakes with the atmosphere. These methods are considered the most valid to date as to accuracy of forecasts, since they allow for integration of numerous parameters and simulation of different scenarios. Combining use of general knowledge with field data and appropriate models is also possible and more accurate.

4.2. EFFECT ON TEMPERATURE

Generally speaking, the larger the water body, the greater its heat capacity or thermal inertia. The water body has the effect of reducing variations in local temperature by cooling the air in spring and summer and warming it in autumn and early winter. Warming may also be seen at night, and cooling during daytime.

Studies carried out at the Rybinsk Reservoir clearly illustrate this theory. In fact, a 3 °C drop in the *diurnal* range was recorded in early summer, with a 3-4 °C increase in nighttime temperatures from June until freezeup, compared with stations located further inland, which confirms the reservoir's local effect.

Un changement de température, même s'il ne s'agit que de 3 °C, peut par contre avoir un effet variable, selon la latitude. Dans les régions chaudes, la création d'un grand réservoir peut diminuer la température locale de 3 °C au plus, et n'avoir aucun effet perceptible sur l'environnement. À l'inverse, en milieu nordique, une diminution d'un seul degré peut se faire sentir sur certains écosystèmes sensibles.

Dans les zones tempérées du nord, ces modifications des températures printanières et automnales ont pour conséquence de retarder la fonte des glaces au printemps et le gel au début de l'hiver. C'est ce qu'on a constaté au réservoir Ob en Sibérie où, au printemps, les températures enregistrées aux stations littorales sont plus basses à cause du mouvement des glaces. De plus, en automne, la période sans gel est allongée de 16 jours dans les Grands Lacs, et de 5 à 15 jours au réservoir Rybinsk, comparativement aux stations plus éloignées; une telle prolongation a pour effet de repousser à plus tard, au printemps et à l'automne, la saison de végétation ainsi que la période de reproduction des poissons.

Les réservoirs peuvent également agir sur la stabilité atmosphérique. En été, ils créent des conditions plus stables, ce qui entraîne une diminution de l'effet de *convection*. En hiver, ils augmentent l'instabilité et, par le fait même, l'effet de convection.

4.3. RÉGIME DES VENTS

Généralement, la création d'un grand plan d'eau atténue le relief, qui offre moins de résistance à la circulation de l'air; cela se traduit par une augmentation de la vitesse du vent.

De telles observations ont été faites en Russie; par exemple, la fréquence des vents forts augmente près des réservoirs, comparativement aux stations à l'intérieur des terres. Cette fréquence est multipliée par 25 la nuit, et par 3 le jour près du réservoir Rybinsk, avec un maximum de vitesse sur les rives la nuit, et un minimum le jour. Au réservoir Ob, on note une nette augmentation du nombre de jours de grands vents, et des vitesses mensuelles moyennes plus élevées de 25 à 40 %. On a également observé sur ces deux réservoirs une diminution de la fréquence des vents faibles en été.

À la faible rugosité de l'eau s'ajoutent la stabilité atmosphérique, affectée par la différence de température de l'air au-dessus du réservoir et sur la terre environnante, ainsi que l'effet du fetch sur le plan d'eau. Il s'ensuit des grands vents lorsque l'air est instable et que les fetchs sont longs, mais des vents faibles dans le cas contraire.

À moins d'un relief riverain très escarpé, qui modifie dans une certaine mesure la circulation locale, la règle générale tend à démontrer que l'influence d'un réservoir sur le climat se fait sentir dans les régions avoisinantes, sur une distance à peu près égale à la distance parcourue par le vent sur l'eau. De plus, la création d'un grand réservoir entraîne généralement un allongement de la rose des vents dans la direction du fetch le plus long. Au réservoir Rybinsk, où le terrain est dénudé, la zone d'influence sur les rives est évaluée à 15-20 km la nuit et à 4-6 km le jour, compte tenu de la vitesse du vent et de son parcours sur la retenue.

A change as slight as 3 °C may, however, have a variable effect depending on the latitude of the reservoir in question. In warm regions, the creation of a large reservoir may lower the local temperature by 3 °C at most and have no perceptible effect on the environment. On the other hand, in northern latitudes, a drop of one single degree may have an impact on some sensitive ecosystems.

These spring and autumn temperature changes have the effect in temperate northern zones of delaying the ice breakup, as well as the freezeup in early winter. That is what was observed on the Ob Reservoir in Siberia, where temperatures are colder in the spring at lakeshore stations owing to the movement of ice. Moreover, the ice-free period in autumn is prolonged by 16 days in the Great Lakes and by 5-15 days at the Rybinsk reservoir compared with more distant stations; this has the effect of moving the growing season and the fish reproduction period to later in the spring and autumn seasons.

Reservoirs can also affect atmospheric stability. In summer they give more stable conditions so that *convection* is decreased. In winter they enhance instability so that convection is increased.

4.3. WIND REGIME

In general, the creation of an extensive water body creates a large flat surface and offers less resistance to the flow of moving air; with increased wind velocity.

Such observations were made in Russia; for instance, the frequency of high winds increased near reservoirs compared with inland stations; this frequency is multiplied by 25 at night and by three in daytime near the Rybinsk Reservoir, with a maximum onshore velocity at night and a minimum during the day. At the Ob Reservoir, there is a marked increase in the number of days with high winds, with mean monthly velocities 25-40 % higher. A decrease in the frequency of low winds was also observed for these two reservoirs during summer.

Added to the low friction of water is the atmospheric stability affected by the air-temperature contrast over the reservoir and over the surrounding land, and also the effect of the fetch on the winds over the water body. The result is high velocities in cases of instability and long fetches, and low wind speeds when the opposite prevails.

Unless the surrounding landform is steeply sloping, thus affecting local circulation somewhat, the general rule tends to show that the climatic influence of a reservoir is generally felt on neighbouring regions over a distance roughly equal to that travelled by the wind over water. The creation of a large reservoir usually also involves an elongation of wind roses in the direction of the longest fetch. At the Rybinsk reservoir, where the terrain is treeless, the zone of onshore influence is estimated at 15-20 km at night and 4-6 km during the day, depending on the velocity of the wind and its path over the impoundment.

4.4. RÉGIME DES GLACES

Comme nous l'avons mentionné précédemment, en plus du retard dans la formation et la fonte des glaces résultant des changements de température, l'augmentation de la vitesse du vent a des répercussions sur la formation des vagues qui, à leur tour, influencent la formation de la couche de glace. C'est ainsi qu'on peut assister à la formation de bancs de glace plus importants dans les parties les plus exposées de la retenue, comme ce fut le cas au réservoir Ob, où l'augmentation de la vitesse du vent, sur la retenue, a sans doute été à l'origine de la formation d'embâcles.

Des embâcles peuvent aussi se former à l'aval par suite des changements de débit qui se produisent en hiver. On peut atténuer ce problème par des mesures efficaces, soit en changeant le régime des eaux (écoulement faible et régulier), en élargissant les sections étroites du cours d'eau (diminution de la vitesse), ou en installant des estacades à glace à des endroits précis, afin d'y favoriser la formation des glaces. On a également remarqué dans la Grande Rivière (Baie James, Canada), en aval de la centrale LG-2, que l'eau plus chaude évacuée en hiver faisait fondre la couche de glace ou la rendait plus mince et plus fragile, rendant ainsi la circulation sur la glace dangereuse.

4.5. ÉVAPORATION ET HUMIDITÉ

Il est généralement admis que, pour un même régime climatique, la quantité d'eau qui s'évapore annuellement d'une masse d'eau est proportionnelle à la surface du plan d'eau et inversement proportionnelle à sa profondeur. Par exemple, le lac Supérieur a une évaporation de 546 mm/an, alors que celle du lac Ontario est de 814 mm/an. On a également enregistré une augmentation globale de 2,5 % de l'évaporation au réservoir de la Volga, pour un volume d'eau de 6 km³, comparativement à une augmentation de 5 % dans le réservoir du Dniepr, dont le volume d'eau n'est que de 2,5 km³.

Il semble également que la variation saisonnière de l'évaporation soit plus grande pour les lacs peu profonds, alors que pour les lacs plus profonds l'évaporation minimale et maximale se fasse plus tard en saison.

On a également observé, en ancienne Union Soviétique, un taux d'humidité plus élevé dans la région proche du lac, comparativement au taux enregistré aux stations situées à l'intérieur des terres dans la direction du vent. On a observé le même phénomène au Pakistan (retenue de Tarbela), avec une augmentation du taux d'humidité allant de 5 à 10 % dans un rayon de 15 km autour de la retenue.

Lorsqu'il est question de l'influence des nouvelles retenues sur le climat, il faut tenir compte de la différence entre le régime d'évaporation d'une masse d'eau libre et celui d'une couverture végétale, par exemple de lichens ou de conifères. Le problème se complique davantage du fait de l'interaction de l'eau du sol, de l'humidité, de la pression atmosphérique et du vent. Aux réservoirs de la Baie James, par exemple, on a prévu une diminution de l'évaporation annuelle à cause de la persistance de la couche de glace au printemps, qui freine l'absorption des

4.4. ICE REGIME

Aside from the delay in freezeup and breakup associated with temperature changes, as mentioned above, the increase in wind speeds acts on the formation of waves, which in turn influence the formation of ice cover. Thus larger ice banks may form in the more exposed parts of the impoundment, as observed in the Ob Reservoir, where ice jams were doubtless caused by the increased wind velocity over the impoundment.

Also, downstream ice jams may occur as a result of changes in winter discharge. Effective measures to mitigate these problems by facilitating ice covering are changes in water regime (lower and steady water flow) and enlarging narrow river sections (lowering velocity) or installing ice booms in specific sections to promote ice cover. It was also observed in La Grande river (James Bay, Canada) downstream of LG 2 power house that warmer water released during winter time eliminated ice cover or provoked thinner and more fragile ice cover that became hazardous for access and circulation on ice.

4.5. EVAPORATION AND HUMIDITY

It is generally accepted that, in the same climatic regime, the amount of water evaporated annually by a water body is proportional to its area and is inversely proportional to its depth. For instance, Lake Superior has evaporation of 546 mm/year, while the figure for Lake Ontario is 814 mm/year. An overall evaporation increase of 2.5 % was also observed for the Volga Reservoir 6 km³ of water volume, compared with a 5 % increase in the Dnieper Reservoir, whose volume is only 2.5 km³.

It also appears that the seasonal variation is higher for shallower lakes, whereas deeper lakes have later minimum and maximum evaporation dates.

Observations in the Soviet Union also indicate a higher humidity level in the immediate region of the lake, compared with inland stations located downwind. The same observations were noted in Pakistan (Tarbela Reservoir) with an increase between 5 to 10 % over a zone of 15 km around the reservoir.

One problem to be considered with respect to the climatic influence of new impoundments is the difference between the evaporation regime of an open-water body and that of a vegetative cover, such as lichen or a coniferous forest. The problem is further complicated by the interaction of soil moisture, humidity, atmospheric pressure and wind. In the case of the James Bay Reservoirs, for example, lower annual evaporation was forecast, owing to the prolonged ice cover in the spring, which hampers the absorption of solar radiation, the higher evaporati-

rayons solaires, du pouvoir d'évaporation de la végétation plus grand que celui de l'eau, des températures plus élevées et des flux turbulents maximaux en automne.

4.6. PRÉCIPITATIONS

L'influence d'une masse d'eau sur les précipitations locales est reconnue, mais elle est l'objet de multiples controverses. Les effets sont souvent variables.

Par exemple, la pluie est apparue à Assouan depuis la création du lac Nasser. Au Ghana, dans la grande région du lac Volta, on a observé un changement dans le régime des précipitations et un déplacement de la période pluviale de pointe d'octobre, aux mois de juillet et d'août. On a aussi constaté, au barrage Tarbela (Pakistan), une augmentation régulière des précipitations, la période de pointe étant en juillet. On a également signalé une hauteur annuelle totale de précipitations plus élevée à Kenyir (Malaisie) depuis la création de la retenue, mais la période de temps écoulée est insuffisante pour qu'on puisse conclure à une relation de cause à effet. La variation mensuelle des précipitations y est toutefois moins marquée.

On constate l'effet inhibiteur des grandes étendues d'eau sur les averses et les orages, plus particulièrement en climat tempéré. C'est le cas au lac Michigan (Grands Lacs), où les précipitations enregistrées sont inférieures de 6 % à la quantité observée aux stations situées à l'intérieur des terres.

Plus précisément, le ralentissement dans la croissance des nuages de convection et la diminution du nombre des averses provoquées par les grandes retenues se font sentir surtout au printemps et au début de l'été, alors que le contraire se produit à l'automne et au début de l'hiver. Cela s'explique par la grande quantité d'énergie que la masse d'eau absorbe au printemps et en été, et par la non moins grande quantité d'énergie qu'elle libère en automne. À titre d'exemple, on a observé, en été, une hausse des précipitations de 5 à 7 % au lac Omega, sur la Volga, et sur les zones riveraines. On a par ailleurs observé, dans la vallée du Fraser (Canada), une diminution des précipitations de 20 % en été (juillet) dans la direction du vent, à partir du réservoir, mais une augmentation de 10 % en hiver. Quant à la région du réservoir Rybinsk, elle se distingue des autres régions par une diminution de la quantité de précipitations de 10 mm en juillet, ce qui représente une diminution de l'ordre de 33 % par rapport à d'autres endroits.

4.7. BROUILLARD

La formation de brouillard est généralement plus fréquente après la création d'un réservoir. Dans les climats chauds, une grande retenue, peu profonde, contribue généralement à augmenter la quantité de brouillard les jours les plus froids.

Par contre, dans les climats tempérés et froids, le brouillard se forme durant les saisons plus froides, de même que durant la nuit et le matin. Ainsi, au printemps, après la débâcle, le brouillard se produit par l'*advection* d'air chaud et humide

vity of vegetation than of water, and warmer temperatures and maximum turbulent fluxes in autumn.

4.6. PRECIPITATION

The influence of a water body on local precipitation, while acknowledged, is the subject of much controversy. The effects are often variable.

For instance, rain has appeared at Aswan since Lake Nasser was created. In Ghana, in the general area of Lake Volta, a change in the precipitation regime was observed, with the rain peak moving from October to July and August. A regular increase with a peak in July was also observed at Tarbela dam in Pakistan. Higher total annual precipitations were also reported in Kenyir (Malaysia) since impounding but the time lapse is insufficient to conclude that it is due to the reservoir formation. Variations in monthly rainfall are however less distinct.

Particularly in temperate climates, the inhibiting effect of large water bodies on showers and storms is seen, as on Lake Michigan (Great Lakes), where precipitation is 6 % lower than at inland stations.

More specifically, the inhibition of convective cloud growth and the less frequent occurrence of showers caused by major water bodies occurs primarily in spring and early summer, with the opposite effect in autumn and early winter. This fact is explained by the vast amount of energy absorbed by the water body in spring and summer, and the large amount released in autumn. For instance, a 5-7 % rise in precipitation was observed on Lake Omega on the Volga in summer, as well as on the surrounding area. Observation for the Fraser Valley (Canada) showed there was a 20 % decrease in precipitation in summer (July) downwind of the reservoir, but a 10 % increase in winter. The Rybinsk Reservoir region differs from other regions in that it has seen a 10 mm drop in precipitation in July, meaning it receives approximately one-third less precipitation than elsewhere.

4.7. FOG

Fog generally occurs more frequently after a reservoir is built. In warm climates, a large shallow impoundment area can increase fog generally on the coolest days.

On the other hand, in temperate and cold climates, fog forms in the colder seasons, as well as during night and morning hours. Thus, in spring after the ice breakup, fog results from the *advection* of warm, moist air across a cold lake, and is

au-dessus d'un lac froid, pour être ensuite transporté par le vent vers les terres environnantes. On observe ce phénomène surtout au-dessus des grands réservoirs (1 000 km²).

Le problème peut être plus grave en automne où le brouillard se forme en raison du passage de l'air froid au-dessus de l'eau plus chaude. On voit alors apparaître un dépôt de givre et de glace sur les surfaces avoisinantes; avec le vent, ce brouillard glacé peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres au-delà de la retenue. Des températures hivernales de - 30 °C et des vents légers constituent des conditions idéales pour la formation d'un tel brouillard. Ainsi, au lac Diefenbaker (Saskatchewan, Canada), on a observé, dans un rayon de 3 km, la formation de véritables « murs » de nuages, avec des dépôts de cristaux de glace de 50 à 75 mm d'épaisseur sur les rives et sur tout le territoire en deçà de 3 km. Un tel phénomène limite la circulation et cause des dommages graves aux ouvrages, aux installations électriques et à la végétation.

Une telle situation peut également se produire lorsqu'une circulation catabatique d'air froid provenant des montagnes environnantes se retrouve par advection au-dessus d'une surface d'eau chaude. Ce phénomène est particulièrement marqué en automne, dans les cours d'eau de l'Île du Sud, en Nouvelle-Zélande, où il y a un gradient élevé de température et tension de vapeur à la surface de l'eau.

Des études faites en Suède et au Canada indiquent une augmentation du brouillard en certains endroits, quelques jours par année en hiver, surtout en aval du réservoir, à cause de l'absence de glace résultant de changements dans le débit.

4.8. CONCLUSION

Bien que les incidences climatiques des réservoirs sur le climat semblent plutôt locales, il est important de les prévoir pour tous les nouveaux réservoirs de dimensions importantes.

Des méthodes d'évaluation ont été décrites au paragraphe 4.1. Aujourd'hui, les données disponibles et la puissance des modèles mathématiques augmentent continuellement, ce qui permet d'établir des prévisions de plus en plus précises.

Il faut noter que l'entretien des forêts avoisinantes limite également les changements climatiques potentiels.

then carried by the wind toward the surrounding land. These phenomenon are mainly observed on large reservoir (1 000 km²).

The problem can be more serious in autumn, when fog is formed by the passage of cold air over warmer water. Frost and ice are then deposited on nearby surfaces; with wind, this ice fog can extend several hundred meters from the water. Winter temperatures of -30°C and light winds are the ideal conditions for such fog to form. Thus, at Lake Diefenbaker (Saskatchewan, Canada), « walls » of cloud have been seen, with deposits of ice crystals 50-75 mm thick on the lakeshore and all the territory within 3 km. Such a phenomenon inhibits circulation and causes serious damage to structures, electrical installations and vegetation.

This can also occur in basins where Katabatic flows of cold air from surrounding mountains are advected over a warm water surface. In New Zealand South Island Rivers, it is particularly marked in autumn where there is a large gradient of temperature and vapour pressure at the water surface.

A local increase of fog with a few days per year during wintertime is reported from Swedish and Canadian investigations, due to ice-free water surfaces, especially downstream of the reservoir, as a result of changes in winter discharge.

4.8. CONCLUSION

Although climatic effects of reservoirs are likely to be quite local, it is emphasized that predictions should be made for all new reservoirs of significant size.

Methodology has been described in section 4.1. Available data and the power of mathematical models are continually increasing, matching the accuracy of predictions steadily more reliable.

Maintenance of adjacent forests reduces potential climate changes.

5. REFERENCES

- , 1984. Ecosystems of the World 23. *Lakes and Reservoirs*. F.B. Taub, Editor, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 643 pp.
- ACKERMAN, W.C., WHITE, G.F., WORTHINGTON, E.B., (EDS.), 1973. *Man Made Lakes : Their Problems and Environmental Effects*, Washington D.C., American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series 17.
- ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉLECTRICITÉ, 1985. *Décharge de mercure dans les réservoirs hydroélectriques*. Projet 185 G399, 161 pp.
- ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉLECTRICITÉ, 1986. *Prévision des incidences dans l'environnement des aménagements hydroélectriques au Canada*. Projet 317 G472, 3 volumes.
- BAXTER, R.M., GLAUDE, P., 1980. *Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada : expériences et perspectives d'avenir*. Bulletin canadien des sciences halieutiques et aquatiques n° 205F, Ottawa, 36 pp.
- BILLFALK, L., 1981. *Breakup of solid ice covers due to rapid water level variations*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Report 82-3, Hanover, USA.
- BILLFALK, L., 1981. *Formation of shore cracks in ice covers due to changes in the water level*. Proc. IAHR Int. Symp. on Ice, Québec.
- BILLFALK, L., 1984. *Strategic hydro power operations at freeze-up, reduced ice jamming*. Proc. IAHR Ice Symposium, Hamburg.
- BROUARD, D., DEMERS, C., LALUMIÈRE, R., SCHETAGNE, R., VERDON, R., 1989. *Summary Report. Evolution of mercury levels in fish of the La Grande hydroelectric complex, Québec (1978-1989)*. Joint report. Vice-présidence Environnement, Hydro-Québec and Groupe Environnement Shooner inc., 97 pp.
- CANADIAN ELECTRICAL ASSOCIATION, 1984. *Biological Mitigation Measures for Canadian Hydro Facilities Contract*. N° 156 G 315. Acres Consulting Services Limited.
- CENTRE DE RECHERCHE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT (CERSE), 1977. *Analyse du climat de la région de la Grande rivière de la Baleine et étude préliminaire de l'impact climatique des futurs réservoirs*.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1980. *Les barrages et l'environnement/Dams and the Environment*. Bulletin 35.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1981. *Une réussite, les barrages et l'écologie/Dam Projects and Environmental Success*. Bulletin 37.

- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1985. *Barrages et environnement - Notes sur les influences régionales/Dams and the Environment - Notes on Regional Influences*. Bulletin 50.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1988. *Barrages et environnement - Exemples vécus/Dams and Environment - Cases Histories*. Bulletin 65.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1989. *Barrages et environnement - La fermeture du Zuiderzee/Dams and Environment - The Zuiderzee Damming*. Bulletin 66.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1992. *Barrages et environnement - Effets socio-économiques/Dams and Environment - Socio-economic Impacts*. Bulletin 86.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1993. *Barrages et Environnement - Effets géophysiques/Dams and Environment - Geophysical Impacts*. Bulletin 90.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1988. *Comptes rendus du 16^e Congrès de San Francisco/16th Congress Proceedings, San Francisco*. Volume I, Question 60.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB-ICOLD), 1991. *Comptes rendus du 17^e Congrès de Vienne/17th Congress Proceedings, Vienna*. Volume I, Question 64.
- FITZHARRIS, B.B., 1979. *Climatic Questions Arising from Upper Clutha Valley Hydro Development*. New Zealand Geographer. Vol. 35, N° 2, pp. 64-70.
- GARZON, Camilo E., 1984. *Water Quality in Hydroelectric Projects-Considerations for Planning in Tropical Forest Regions*. World Bank Technical Paper n° 20, World Bank, Washington, 33 pp.
- GUERTIN, G., DEMERS, C., PÉRUSSE, M., 1993. *La Grande Rivière: "In Accord with its Environment" a Case Study*. Water Resources. Development Vol. 9, No. 4, pp. 387-409.
- GUERTIN, G., TREMBLAY S., VILLENEUVE, D., 1990. *The Manicouagan-Outardes Complex*. Case study. May 1991, Hydro-Québec Draft Report not published, 49 pp.
- HYDRO POWER IN SWEDEN, 1981. Published by the Swedish Power Association and the Swedish State Power Board.
- HYDRO-QUÉBEC, 1989. *Effets environnementaux cumulatifs. Évaluation globale des effets climatiques des futurs aménagements d'Hydro-Québec*. Météoglobe Canada. 74 pp.
- HYDRO-QUÉBEC, 1991. *The lessons of the La Grande complex (Phase 1)*. Proceedings of a Conference in the General Program of the 59th annual Meeting of Association canadienne française pour l'avancement des sciences, Université de Sherbrooke et Hydro-Québec, Québec, Canada, March 1991.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD), 1993. *High Aswan Dam Vital Achievement Fully Controlled*. 61st Executive Meeting and Symposium, 1-6 November, Cairo, 432 pp.
- INTERNATIONAL COUNCIL OF SCIENTIFIC UNIONS/CONSEIL INTERNATIONAL DES UNIONS SCIENTIFIQUES, 1972. *Man-made Lakes as*

Modified Ecosystems. Scope Working Group on Man-made Lakes. Scope Report 2, Paris.

LA BOUNTY, J.F., TIMBLIN, Jr, L.O., 1988. *A Case History: Environmental Protection and Enhancement in the Planning, Construction and Operation of Mt. Elbert Pumped Storage Powerplant*. Question 60, Report 25, Sixteenth Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, San Francisco, USA, June 1988.

MAHMOOD, K., 1987. *Reservoir Sedimentation-Impact, Extent, and Mitigation*. World Bank Technical Paper Number 71, World Bank.

MANCY, KHALI, H., 1980. *The Aswan High Dam and Lake Nasser*. In Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments held June 2-5, 1980, Minneapolis, Minnesota. H.G. Stefan ed. Publ. American Society of Civil Engineers, New York.

PALMIERI, S., 19—. *Assessment of the Environmental Impact of Reservoirs*.

SCHETAGNE, R., 1991. *Suivi de la qualité de l'eau, du phytoplancton, du zooplancton et du benthos au Complexe La Grande, territoire de la Baie James*. Les enseignements de la phase 1 du Complexe La Grande. Actes du Colloque. 59^e Congrès de l'ACFAS. Université de Sherbrooke. pp. 1325.

SCHETAGNE, R., ROY, D., 1985. *Physico-chimie et pigments chlorophylliens*. Réseau de surveillance écologique du Complexe La Grande, 1978-1984. Direction Ingénierie et Environnement, Société d'énergie de la Baie James, Montréal, 137 pp.

SMITH, SCOT E., 1986. *General Impacts of Aswan High Dam*. Journal Water Resources Planning and Management, Vol. 112, No. 4, October 1986.

TH'NG, Y.H., Z. ABIDIN, O., LEE, S.S., CHAI, C.N., 1991. *Some environmental aspects of dam projects in Malaysia: operational results and observations*. Proceedings of 9th Conference of Asian Federation of Engineering Organisation – Environmental Impacts and Assessment, Bangkok, Thailand.

TIMBLIN, Jr, L.O., 1991. *Dams and River Water Quality*. Question 64, Report 37, Seventeenth Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, Vienna-Austria, June 1991.

TUNDISI, J.G., MATSUMURA-TUNDISI, T., 1990. *Limnology and eutrophication of Barra Bonita reservoir, S. Paulo State, Southern Brazil*. Arch. Hydrobiol. Beih. 33. pp. 661-676.

TUNDISI, J.G., 1990. *Key factors of reservoir functioning and geographical aspects of reservoir limnology*. Chairman's overview. Arch. Hydrobiol. Beih. 33. pp. 645-646

6. GLOSSAIRE

- Activité microbienne :** Ensemble des changements biochimiques résultant du métabolisme des organismes vivants. *Référence : Dictionnaire de l'eau - Office de la langue française. Cahiers de l'Office de la langue française, page 4.*
- Adsorption :** Rétention à la surface d'un solide (dit adsorbant) des molécules d'un gaz ou d'une substance en solution ou en suspension. *Référence : Petit Robert I, page 27.*
- Anaérobie :** Se dit des micro-organismes qui se développent normalement dans un milieu dépourvu d'air ou d'oxygène. *Référence : Petit Robert I, page 64.*
- Anoxie :** Diminution ou suppression de l'oxygène délivré au niveau des cellules. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 37.*
- Benthos :** Ensemble des organismes aquatiques vivant sur le fond des mers ou des lacs, ou à proximité de celui-ci, et qui en dépendent. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 71.*
- Biomasse :** Masse totale de matière vivante, animale et végétale, présente dans un biotope délimité, à un moment donné. Elle est exprimée en poids de matière sèche. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 75.*
- Biotope :** Aire géographique bien délimitée, caractérisée par des conditions écologiques particulières (sol, climat, etc.), servant de support physique aux organismes qui constituent la biocénose. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 77.*
- Convection :** Mouvement vertical complexe (ascension et descente) prenant naissance dans un fluide au contact d'une source de chaleur. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 125.*
- Désorption :** Rupture des liaisons entre un corps absorbé et le substrat. *Référence : Dictionnaire Français Plus, page 490.*
- Diurne :** Se dit de tout phénomène biologique (vol des oiseaux, prédation, épanouissement de certaines fleurs, etc.) survenant pendant le jour. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 164.*
- Épilimnion :** Couche superficielle de l'eau des lacs, riche en oxygène et où le gradient thermique est faible. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 189.*
- Eutrophe :** En limnologie, se dit des eaux riches en matières nutritives et peu oxygénées en profondeur. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 203.*
- Eutrophisation :** Phénomène de prolifération des plantes aquatiques et des bactéries anaérobies dans une étendue d'eau en raison des déversements d'égouts et d'effluents riches en phosphates, nitrates et composés organiques. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 202.*
-

- Évapotranspiration** : Phénomène naturel réunissant à la fois l'évaporation par le sol et la transpiration par les végétaux. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 203.*
- Hypolimnion** : Couche profonde et épaisse de l'eau des lacs, pauvre en oxygène en été et marquée par une température inférieure à celle de l'eau de surface. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 275.*
- Invertébré** : Se dit d'un animal dépourvu de vertèbres, de squelette. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 292.*
- Lacustre** : Relatif aux lacs; qui vit ou croît sur le bord ou dans les eaux des lacs. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 304.*
- Macrophyte** : Terme générique désignant toute plante visible à l'œil nu. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 324.*
- Mésoclimat** : Climat d'une région naturelle de faible superficie (vallée, baie, etc.). *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 337.*
- Mésotrophe** : En limnologie, se dit d'un milieu limnique de type oligotrophe dégradé, caractérisé par un déficit relatif en oxygène et un enrichissement des sédiments en matières organiques putrescibles. Il s'agit d'un état transitoire entre l'oligotrophie et l'eutrophie. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 339.*
- Méthylation** : Activité microbienne qui transforme le mercure contenu dans la matière organique en décomposition en un composé toxique, le méthylmercure (CH₃)₂ Hg, qui s'accumule le long de la chaîne alimentaire. *Référence : Vocabulaire des études environnementales, page 59.*
- Monomictique** : Se dit d'un lac dont la température ne descend jamais au-dessous de 4 °C. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 354.*
- Morphologie** : Étude scientifique de la forme, de la structure des organismes vivants. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 358.*
- Mutagène** : Se dit d'un agent chimique ou physique susceptible de provoquer des mutations chez une espèce. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 361.*
- Oligotrophe** : En limnologie, se dit d'un lac dont les eaux contiennent peu de matières nutritives dissoutes mais sont riches en oxygène. Ces eaux renferment une biomasse pauvre. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 382.*
- Oxydo-réduction (Potentiel d')** : Pouvoir et vitesse à laquelle l'eau usée consommera l'oxygène.
- Oxygène dissous** : Dans des conditions de température déterminées, quantité d'oxygène dissous dans une eau. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 393.*
- pH** : Mesure du degré d'acidité ou d'alcalinité d'une solution, d'un sol. Il s'agit du logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ions H⁺. Si le pH est inférieur à 7, la solution est acide; s'il est supérieur à 7, la solution est alcaline.

- Phytoplancton :** Ensemble des organismes du plancton qui appartiennent au règne végétal. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 428.*
- Pouvoir tampon :** Action de certains ions en solution, empêchant une variation brusque de la concentration en ions hydrogène. *Référence : Dictionnaire de l'eau - Office de la langue française. Cahiers de l'Office de la langue française, page 192.*
- Réaération :** Seconde aération des boues d'égout à des fins diverses. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 487.*
- Riprap :** Couche d'enrochements ou de blocs préfabriqués disposés en vrac sur le talus amont d'un barrage en remblai ou sur les berges d'un réservoir ou les rives d'un canal, en tant que protection contre l'action des vagues, des courants ou des glaces. *Référence : Glossaire de termes relatifs aux barrages, CIGB, Bulletin 31 a, page 43.*
- Stratification thermique :** Au sein d'une masse d'eau, existence de couches de températures différentes, réparties selon leur densité. Ce phénomène est attribuable aux variations climatiques saisonnières. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 548.*
- Temps de séjour :** Temps de séjour d'une substance quelconque dans un fluide, un corps, un système. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 568.*
- Thermocline :** Tranche d'eau marine ou lacustre caractérisée par un fort gradient thermique vertical. *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 574.*
- Turbidité :** Condition plus ou moins trouble d'un liquide, due à la présence de matières fines en suspension (limons, argiles, micro-organismes, etc.). *Référence : Dictionnaire des sciences de l'environnement, page 592.*

6. GLOSSARY

- Adsorption** : 1. The adherence of a gas, liquid, or dissolved material on the surface of a solid. 2. An increase in concentration of gas or solute at the interface of a two-phase system. Should not be confused with absorption. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 5.
- Anaerobia** : 1. A condition in which no free oxygen is available. 2. Requiring, or not destroyed by, the absence of air or free oxygen. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 14.
- Anoxic** : Lacking in oxygen; a synonym for anaerobia. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 16.
- Benthos** : The aggregate of organisms living on or at the bottom of a body of water. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 35.
- Biomass** : The mass of biological material contained in a system. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 38.
- Biotope** : A habitat that is uniform in its main climatic, soil and biotic conditions. *Reference* : *Macmillan dictionary of the environment*, page 51.
- Buffer Action** : The action of certain ions in solution in opposing a change in hydrogen-ion concentration. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 45.
- Buffered** : Resisting changes in pH (q.v.) when acid or alkali is added. A property of many biological fluids, and of seawater. *Reference* : *A dictionary of Biology*. M. Abercrombie, G.J. Hickman, and M.L. Johnson, page 44.
- Convection** : In meteorology, atmospheric motions that are predominantly vertical, resulting in vertical transport and mixing of atmospheric properties. Sometimes caused when large masses of air are heated by contact with a warm land surface. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 81.
- Desorption** : The release or removal of an adsorbed material from the surface of a solid adsorbent. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 99.
- Dissolved Oxygen** : The oxygen dissolved in water, wastewater, or other liquid, usually expressed in milligrams per litre, or percent of saturation. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 107.
- Diurnal** : 1. Occurring during a 24-hr period; diurnal variation. 2. Occurring during the day time (as opposed to night time). *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 109.
- Epilimnion** : A turbulent region of comparatively uniform temperature above the thermocline in a thermally stratified body of water. *Reference* : *Water and Wastewater Control Engineering*, page 131.
-

- Eutrophic (Lake) :** Lake or other contained water body rich in nutrients. Characterized by a large quantity of planktonic algae, low water transparency with high dissolved oxygen in upper layer, zero dissolved oxygen in deep layers during summer months, large organic deposits coloured brown or black. Hydrogen sulphide often present in water and deposits. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 132.*
- Eutrophication :** Nutrient enrichment of a lake or other water body, typically characterized by increased growth of planktonic algae and rooted plants. It can be accelerated by wastewater discharges and polluted runoff. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 132.*
- Evapotranspiration :** Water withdrawn from soil by evaporation and/or plant transpiration. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 133.*
- Hypolimnion :** A region of constant temperature below the thermocline and extending to the bottom in a thermally stratified body of water. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 133.*
- Invertebrate :** Collective term for all animals which are not members of the Vertebrate. *Reference : Penguin reference books, M. Abercrombie, C.J. Hickman, M.L. Johnson (dictionary of biology, page 152).*
- Lacustrine :** Material present in lake beds past or present, such as sedimentary deposits. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 211.*
- Macrophytes :** Large aquatic plants (e.g., crowfoot, water lily), as opposed to phytoplankton and other small plants. *Reference : Macmillan dictionary of the environment, page 241.*
- Mesoclimate :** A local climatic effect, occurring over an area several kilometres wide and 100-200 metres high, where the climate differs from the regional climate. *Reference : Macmillan dictionary of the environment, page 249.*
- Mesotrophe (ic) :** Pertaining to a lake intermediate between the oligotrophic and eutrophic stages of its life cycle. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 229.*
- Methylation :** Process by which a methyl group is attached to an atom or molecule. In mercury methylation, mercuric ions are converted to methyl mercury. *Reference : Federal ecological monitoring program, Technical Appendices, page 139.*
- Microbial :** The activities of micro-organisms resulting in chemical or physical activity changes. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 232.*
- Monomictic :** Body of water with one period of circulation: Cold monomictic Lakes with water temperatures never greater than 4 °C, and with only one period of circulation in the summer at or below 4 °C are called cold monomictic lakes. Warm monomictic : In warm monomictic lakes, temperatures do not drop below 4 °C; they circulate freely in the winter at or above 4 °C, and they stratify directly in the summer.
- Morphology :** The study of the form of organisms or of the Earth's physical features. *Reference : Macmillan dictionary of the environment, page 260.*
- Mutagenic :** Causing mutations. *Reference : Penguin reference books, M. Abercrombie, C.J. Hickman, M.L. Johnson (dictionary of biology, page 185).*

- Oligotrophic :** Lake or other contained water body poor in nutrients. Characterized by low quantity of planktonic algae, high water transparency with high dissolved oxygen in upper layer, adequate dissolved oxygen in deep layers, low organic deposits coloured shades of brown, and absence of hydrogen sulphide in water and deposits. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 251.*
- pH :** A measure of the hydrogen-ion concentration in a solution, expressed as the logarithm (base ten) of the reciprocal of the hydrogen-ion concentration in gram moles per litre. On the pH scale (0-14), a value of 7 at 25 °C represents a neutral condition. Decreasing values, below 7, indicate increasing hydrogen-ion concentration (acidity); increasing values, above 7, indicate decreasing hydrogen-ion concentration (alkalinity). *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 268.*
- Phytoplankton :** Plankton consisting of plants, such as algae. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 270.*
- Reaeration :** The absorption of oxygen into water under conditions of oxygen deficiency. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 299.*
- Redox :** The potential required to transfer electrons from the oxidant to the reductant and used as a qualitative measure of the state of oxidation in wastewater treatment systems. *Reference : Vocabulary of Acid Precipitation and Air Pollution, page 146.*
- Residence time :** Period during which a substance remains in the concerned water body, or an element of the water body itself remains significantly unchanged in location. *Reference : International glossary of hydrology, page 198.*
- Riprap :** A layer of large uncoursed stones, broken rock or precast blocks placed in random fashion on the upstream slope of an embankment dam or on a reservoir shore or on the sides of a channel as a protection against wave, current or ice action. *Reference : Glossary of words and phrases related to dams, ICOLD, Bulletin 31 a, page 43.*
- Thermal stratification :** The formation of layers of different temperatures in bodies of water. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 391.*
- Thermocline :** In a thermally stratified lake, the layer below the epilimnion and above the hypolimnion. It is the stratum in which there is a rapid rate of decrease in temperature with depth. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 391.*
- Turbidity :** 1. A condition in water or wastewater caused by the presence of suspended matter, resulting in the scattering and absorption of light. 2. Any suspended solids imparting a visible haze or cloudiness to water which can be removed by filtration. 3. An analytical quantity usually reported in turbidity units determined by measurements of light scattering. *Reference : Water and Wastewater Control Engineering, page 404.*

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : octobre 1994
N° 16949
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>