

# SAVINGS IN DAM CONSTRUCTION.

*Comments and proposals.*

# ÉCONOMIES DANS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES.

*Reflexions et suggestions.*

**Bulletin 73**



**1989**

Report prepared in French by F. Lempérière,  
Vice-Chairman of the Committee on Technology of  
Dam Construction, with the collaboration of G. Douillet (France)  
English translation by R. Chadwick

*Texte principal préparé en français par F. Lempérière,  
Vice-Président du Comité de la Technologie de  
Construction des Barrages, avec la collaboration de G. Douillet (France)  
Traduction en anglais par R. Chadwick*

# **SAVINGS IN DAM CONSTRUCTION.**

---

*Comments and proposals.*

# **ÉCONOMIES DANS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES.**

---

*Reflexions et suggestions.*

---

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

---

**AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:**

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

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

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

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

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

**NOTICE – DISCLAIMER :**

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON TECHNOLOGY OF DAM CONSTRUCTION  
COMITÉ DE LA TECHNOLOGIE DE CONSTRUCTION DES BARRAGES (\*)  
(1983-1989)

Chairman/Président Brazil/Brésil	E. M. AMARAL
Vice-Chairman/Vice-Président France/France	F. LEMPÉRIÈRE
Members/Membres	
Australia/Australie	R. S. DICKSON
Austria/Autriche	H. POCHHACKER
Canada/Canada	P. REID
China/Chine	C. YANG
Germany (FRG)/Allemagne (RFA)	W. HAUG
Great Britain/Grande-Bretagne	J. BOWCOCK
Indonesia/Indonésie	SURYONO
Italy/Italie	S. MORPURGO
Japan/Japon	T. YAMAMURA
Korea (Rep. of)/Corée (Rép. de)	S. K. KIM
Spain/Espagne	R. del HOYO
USA/États-Unis	W. A. FRASER
USSR/URSS	I. S. MOISEEV
Yugoslavia/Yougoslavie	K. NEIMAREVIC

(\*) Membership in May 1989.  
Composition en mai 1989.

---

## SOMMAIRE

---

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. CONNAISSANCE ET ANALYSE DES COÛTS
3. INCIDENCE DES DÉLAIS D'EXÉCUTION SUR LES COÛTS
4. CRITÈRES DE PROJET, CALCULS, SPÉCIFICATIONS
5. POSSIBILITÉS D'ÉCONOMIES DANS LES PROCÉDURES ET RELATIONS CONTRACTUELLES
6. ADAPTATION DE LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN FONCTION DES COÛTS
7. RECHERCHE DE NOUVEAUX TYPES DE BARRAGES
8. MÉTHODES D'EXÉCUTION
9. RÉSUMÉ ET CONCLUSION

ANNEXES

---

## CONTENTS

---

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. COST REPORTING AND ANALYSIS
3. IMPACT OF CONSTRUCTION TIME ON COST
4. DESIGN CRITERIA, ANALYSIS AND SPECIFICATIONS
5. POTENTIAL SAVINGS IN CONTRACT PROCEDURES AND RELATIONS
6. DESIGN CHANGES WITH REFERENCE TO COST
7. NEW DAM TYPES
8. CONSTRUCTIONAL METHODS
9. SUMMARY AND CONCLUSION

APPENDICES

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

AVANT-PROPOS .....	9
1. INTRODUCTION .....	10
2. CONNAISSANCE ET ANALYSE DES COÛTS .....	16
2.1. Étapes diverses de comparaison des coûts .....	16
2.2. Difficultés spécifiques pour la comparaison des coûts .....	16
2.3. Devis estimatifs .....	16
2.4. Méthode analytique .....	18
2.5. Comparaison globale de prix avec des projets similaires .....	20
2.6. Paramètres représentatifs des principaux éléments .....	20
3. INCIDENCE DES DÉLAIS D'EXÉCUTION SUR LES COÛTS .....	24
3.1. Incidence financière directe .....	24
3.2. Incidence technique .....	24
3.3. Délai de construction optimal .....	26
4. CRITÈRES DE PROJET, CALCULS, SPÉCIFICATIONS .....	30
4.1. Incidence des critères de projet et des calculs sur la sécurité et le coût .....	30
4.2. Incidence des spécifications sur les coûts .....	34
5. POSSIBILITÉS D'ÉCONOMIES DANS LES PROCÉDURES ET RELATIONS CONTRACTUELLES .....	42
5.1. Organisation générale .....	42
5.2. Intervention d'organismes extérieurs .....	44
5.3. Études .....	44
5.4. Travaux .....	50
6. ADAPTATION DE LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN FONCTION DES COÛTS .....	58
6.1. Dispositions générales .....	58
6.2. Maîtrise de la rivière pendant les travaux .....	60
6.3. Reconnaissances, excavations, préparation et traitement des fondations .....	64
6.4. Évacuateurs de crue .....	68
6.5. Barrages en remblai .....	70
6.6. Barrages en béton classique .....	72
6.7. Barrages en béton compacté au rouleau (BCR) .....	78

---

---

## TABLE OF CONTENTS

---

FOREWORD .....	9
1. INTRODUCTION .....	11
2. COST REPORTING AND ANALYSIS .....	17
2.1. Circumstances Surrounding Cost Comparisons .....	17
2.2. Cost Comparison Difficulties Specific to Dam Engineering .....	17
2.3. Unit Cost Estimates .....	17
2.4. Total Cost Estimated by Analytical Method .....	19
2.5. Comparison with Actual Cost of Similar Projects .....	21
2.6. Representative Parameters for Estimating Project Components .....	21
3. IMPACT OF CONSTRUCTION TIME ON COST .....	25
3.1. Direct Financial Impact .....	25
3.2. Technical Impact .....	25
3.3. Construction Time Optimisation .....	27
4. DESIGN CRITERIA, ANALYSIS AND SPECIFICATIONS .....	31
4.1. Impact of Design Criteria and Analysis on Safety and Cost .....	31
4.2. Impact of Specifications on Costs .....	35
5. POTENTIAL SAVINGS IN CONTRACT PROCEDURES AND RELATIONS .....	43
5.1. General Organisation .....	43
5.2. Outside Bodies .....	45
5.3. Design .....	45
5.4. Construction .....	51
6. DESIGN CHANGES WITH REFERENCE TO COST .....	59
6.1. General Arrangement of Works to Aid Construction .....	59
6.2. River Control during Construction .....	61
6.3. Site Investigations, Excavations and Foundation Preparation and Treatment .....	65
6.4. Spillways .....	69
6.5. Embankment Dams .....	71
6.6. Conventional Concrete Dams .....	72
6.7. Roller Compacted Concrete (RCC) .....	79

7. RECHERCHE DE NOUVEAUX TYPES DE BARRAGES .....	82
7.1. Raisons d'une évolution lente de la conception des barrages .....	82
7.2. Motifs d'innovation .....	84
7.3. Possibilités d'évolution de divers types de barrages .....	86
8. MÉTHODES D'EXÉCUTION .....	94
9. RÉSUMÉ ET CONCLUSION .....	96
9.1. Études .....	96
9.2. Construction .....	98
9.3. Conclusion .....	98
ANNEXES : RAPPORTS INDIVIDUEL ET NATIONAUX .....	101
A) P. Londe .....	103
B) Italie .....	107
C) États-Unis .....	111
D) Espagne .....	119
E) France .....	127

7. NEW DAM TYPES .....	83
7.1. Reasons for Present Slow Progress in Dam Design Developments .....	83
7.2. Reasons for New Designs .....	85
7.3. Trends for New Designs .....	87
8. CONSTRUCTIONAL METHODS .....	95
9. SUMMARY AND CONCLUSION .....	97
9.1. Design .....	97
9.2. Construction .....	99
9.3. Conclusion .....	99
APPENDICES : INDIVIDUAL AND NATIONAL REPORTS .....	101
A) P. Londe .....	103
B) Italy .....	107
C) USA .....	111
D) Spain .....	119
E) France .....	127



---

## AVANT-PROPOS

---

Ce Bulletin analyse les possibilités d'économies liées à l'étude ou à la construction des barrages.

Ceux-ci ne sont jamais identiques et il est difficile de comparer leurs coûts et d'apprécier les économies potentielles, souvent sous-estimées, car beaucoup de responsables pensent qu'ils sont proches du coût optimal. L'intérêt de ce Bulletin peut donc être diversement apprécié, mais on peut espérer qu'il apportera à tous quelques idées d'économie pour le présent et des sujets de réflexion pour l'avenir.

Chaque responsable — Maître d'ouvrage, Ingénieur-Conseil, Supervision des travaux, Entrepreneur — pense généralement que les dépenses inutiles sont dues aux autres; or on peut souvent réaliser des économies importantes dans tous les domaines, soit directement par chaque responsable, soit par une meilleure définition des relations contractuelles et des responsabilités.

Je sais gré à M. François Lempérière d'avoir présenté des vues originales et pleines d'intérêt sur un sujet qui n'a pas été jusqu'ici totalement appréhendé. Qu'il en soit vivement remercié.

E. M. Amaral  
Président du Comité de la Technologie  
de Construction des Barrages

---

## FOREWORD

---

This Bulletin reviews the opportunities for cost savings arising from appropriate dam design and construction factors.

No two dams are the same, and it is difficult to compare their cost and assess potential savings, which are often under-estimated; many dam engineers feel that they are close to the optimum. Judgements on this Bulletin may thus be diverse, but it is hoped that all readers will find a few ideas towards a more cost-conscious approach, and may be stimulated to consider what may be done in the future.

Every party involved in the design and construction of a dam — Owner, Engineer, Construction Supervision, Contractor — usually considers that needless costs are the fault of the others, but major savings are often possible in all areas, either through the direct action of each party or through a clearer definition of contract relationship, duties and powers.

I am grateful to Mr. François Lempérière for the original and exciting ideas he has developed on a subject for which there is as yet no clearly formulated approach. He deserves our warmest appreciation.

E. M. Amaral  
Chairman, Committee on Technology  
of Dam Construction

---

# 1. INTRODUCTION

---

Dans la plupart des pays, les publications techniques ne donnent généralement que peu de renseignements précis sur le coût des barrages ou sur l'économie réelle des solutions choisies par rapport à d'autres solutions. De même, les Bulletins ou les rapports aux Congrès de la CIGB font une part très faible à l'analyse et à la comparaison des coûts.

La part faite à l'aspect économique est beaucoup plus importante dans d'autres domaines de l'art de construire. Une raison souvent invoquée pour justifier la situation particulière des barrages est la recherche prioritaire de la sécurité à la rupture, qui devrait primer toute considération économique. Cet argument qui influe de manière décisive sur le choix de beaucoup d'ouvrages *n'a souvent pas de justification réelle et peut représenter un frein puissant à tout progrès*. Il apparaît donc essentiel d'apprécier le risque correspondant en tenant compte des progrès réalisés, et d'en estimer concrètement les conséquences humaines et économiques.

## **Risques et conséquences humaines et économiques des ruptures de barrages**

Le pourcentage de rupture des barrages construits avant 1920 (soit peu avant la création de la CIGB) était voisin de cinq pour cent; il est descendu aux environs de un pour cent pour les ouvrages construits vers 1950. Les relevés mondiaux pour les barrages récents indiquent un taux de rupture de l'ordre de 0,2 %, variant entre un pour cent et moins de un pour mille suivant le type d'ouvrage et la qualité de la fondation : ces chiffres semblent dépendre assez peu de la hauteur des ouvrages et peuvent varier suivant les pays en fonction des conditions naturelles et des précautions prises.

Une grande partie des risques les plus importants, dus notamment aux fondations médiocres ou à certains remblais meubles, se concrétisent le plus souvent à la première mise en eau; mais le risque important dû à la submersion des barrages en remblai résulte souvent du sous-dimensionnement ou du mauvais fonctionnement d'évacuateurs de crue anciens.

On construit par an près de mille barrages de plus de 15 m de haut et les ruptures de barrages récents depuis une trentaine d'années ont causé annuellement en moyenne une centaine de morts; la rupture des barrages récents cause donc statistiquement beaucoup moins d'une victime par barrage construit. Mais ce chiffre moyen couvre des disparités considérables; le risque dépend :

- de la probabilité de rupture variable d'environ un pour cent à moins de un pour mille;
- du nombre d'habitants exposés dans la vallée, qui peut varier de quelques unités à quelques centaines de milliers;
- du taux de victimes en cas de rupture, qui dépend très largement de la rivière, de la surveillance du barrage, des conditions d'information et d'évacuation éventuelle de la population.

---

# 1. INTRODUCTION

---

In most countries, the technical literature usually contains little precise information on dam costs or the real savings from the design finally selected from the various alternatives available. ICOLD Bulletins and Congress Proceedings also allocate little space to cost comparisons and analysis.

Much greater attention is paid to costs in other engineering disciplines. One frequently mentioned reason intended to justify the special situation in dam engineering is that priority is given to safety against failure, which must override any consideration of cost. This argument is the decisive factor in the selection of many dam designs but is *often not really justified and may be a severe obstacle to progress*. It is therefore most important to assess risk on the basis of progress in dam engineering, and make a concrete estimate of the consequences on public safety and economics.

## **Dam failure risks and consequences on public safety and economics**

The percentage of failures in dams built before 1920 (just before ICOLD was formed) was around five per cent; it dropped to around one per cent of those built around 1950. World statistics on more recent dams suggest a failure rate of the order of 0.2 per cent, ranging from one per cent to less than one per thousand according to dam type and foundation quality. These figures appear to be quite independent of dam height and may vary from country to country in connection with natural conditions and the engineering safeguards incorporated.

Most of the major risks, due notably to poor foundations and certain earth embankments, usually materialise during first filling of the reservoir; but the major risk of overtopping of embankment dams is often the result of under-design or inadequate performance of older spillways.

About one thousand dams in excess of 15 m in height are built every year and failures of recently built dams over the last thirty years or so have caused about one hundred deaths annually on average. Statistically therefore, failure of recently built dams causes much less than one victim per dam. But this averaged figure conceals considerable disparities; the actual risk is dependent on :

- failure probability, which ranges from about one per cent to less than one per thousand;
- population numbers in the valley downstream, which may range from a few individuals to several hundred thousands;
- percentage of victims per failure, varying considerably with river conditions, dam monitoring and public warning and evacuation plans (if any).

La probabilité de victimes d'un barrage due à sa rupture, de l'ordre de un en moyenne, peut donc varier en fait de plusieurs centaines (et il faut probablement dans ce cas éviter la construction) à un chiffre inférieur à 0,01. Le risque doit aussi naturellement être comparé à l'importance du barrage.

Pour la plupart des barrages, le risque en vies humaines dû aux accidents du travail pendant la construction est plus élevé que le risque dû à la rupture de l'ouvrage. La construction de barrages dans le monde entraîne chaque année sur les chantiers plusieurs centaines de morts (et peut-être plusieurs milliers) et plusieurs dizaines de milliers de blessures sévères. Ce risque varie beaucoup en fonction des dispositions prises par l'Entrepreneur et du contrôle correspondant exercé par le Maître d'ouvrage et la Supervision. Ce risque peut varier aussi en fonction de la nature des travaux, être plus élevé notamment pour les travaux souterrains ou les fouilles escarpées (une analyse de ce risque serait d'ailleurs très utile). Enfin, le risque d'accidents de chantier est fonction des effectifs présents, c'est-à-dire, en fait, généralement du volume des travaux; *un surdimensionnement inutile des ouvrages peut ainsi conduire à accroître et non à réduire le risque humain.*

Par ailleurs, dans beaucoup de pays, l'affectation d'économies possibles sur le coût des barrages à l'amélioration de la sécurité dans d'autres domaines peut procurer un gain en vies humaines extrêmement important.

Il est globalement utile d'apprécier la valeur économique liée globalement à la rupture de barrages. La perte correspondante inclut la valeur des ouvrages, les dommages matériels causés à l'aval, les dommages indirects à l'économie du pays et d'une manière ou d'une autre la prise en compte des pertes humaines estimées de façon très variable suivant les pays et suivant les problèmes.

Bien qu'il ne semble pas exister de statistiques sur ce point, l'ordre de grandeur global de la perte économique résultant de la rupture de barrages paraît inférieur annuellement à un pour cent de la valeur des ouvrages mis en service dans le même temps. Le gain correspondant qu'on peut espérer dans les prochaines décennies n'est donc que quelques millièmes de la valeur des investissements et le risque économique (qui peut souvent être assuré) est moins important que le risque humain.

#### **Importance des coûts d'exploitation et d'entretien**

Les coûts d'exploitation, surveillance et réparation des barrages ne représentent qu'un coût annuel moyen de l'ordre de un pour cent du montant de l'investissement et souvent moins, et leur prise en compte intervient généralement assez peu dans le choix des ouvrages (sauf pour la décision d'évacuateurs de crue vannés ou non vannés). La valeur capitalisée de ces coûts n'est donc que de l'ordre de 10 % du coût d'investissement.

La recherche d'économie dans la construction ne doit pas sous-estimer l'incidence possible du choix des projets sur les coûts d'entretien, ni sur le risque d'interruption de service pour réparation éventuelle importante, mais cette incidence éventuelle ne peut représenter généralement au maximum que quelques pour cent des investissements.

#### **Évaluation des économies envisageables dans l'étude et la construction des barrages**

Il est difficile de donner une estimation précise des économies qui peuvent s'envisager. L'examen *a posteriori* de nombreux ouvrages permet d'estimer que

This means that the dam failure victim probability, less than one on average, may in fact range from several hundred (in which case the dam should probably not be built) to a low figure under 0.01. The risk must also of course be compared with the size of the dam.

At most sites, the risk of fatal accidents to workmen during construction is greater than the risk from dam failure. Dam building worldwide causes several hundred jobsite deaths annually (and perhaps several thousands), with several tens of thousands of severe injuries. The risk varies greatly with the contractors organisation and owner's and site management's supervision. It may also vary according to the type of work involved, being higher in tunnelling operations and steep-sided excavations (an analysis of this risk would in fact be most useful). Lastly, the jobsite risk also depends on the amount of labour in use, i.e. on the size of the job in general. For this reason, *overdesign may in effect increase rather than reduce the risk to human life.*

In many countries, allocating potential savings on dam costs to improving safety in other areas might well result in a substantial saving in human lives.

It is also instructive to estimate the overall economic value associated with dam failures. Losses include the value of the dam and associated structures, damage to property downstream, indirect effects on the country's economy and, in one way or another, the value of the lives lost, which is calculated in very different ways according to the country and the issues relevant to each case.

Although there do not appear to be any statistics on this topic, the order of magnitude of the overall economic losses arising from dam failures appears to be less than one per cent annually of the value of the structures commissioned in the same period. Prospective savings in the coming decades would therefore represent only a few thousandths of the relevant capital investment, and the economic risk (which may often be covered by insurance) is less important than human risk.

#### **Importance of operating and maintenance costs**

The average annual cost of dam operation, monitoring and repair represents only some one per cent of the capital cost and often less, and usually has only a slight influence on the choice of alternative (except in the choice between gated and free-overspill spillways). When this cost is capitalised, it only represents something of the order of 10 % of the capital cost.

The search for savings on construction should not underestimate the possible impact of design choice on maintenance costs or on the risk of interruptions to operation for potentially major repairs, but it would not represent at most more than a few per cent of the capital cost in most cases.

#### **Estimated potential savings in dam design and construction**

It is difficult to give any precise estimate of potential savings from appropriate design and construction procedures. Post facto examination of many projects

l'économie potentielle globale est rarement inférieure à dix pour cent et atteint exceptionnellement cinquante pour cent. Un objectif d'économie moyenne de l'ordre de vingt pour cent n'est probablement pas utopique; cet ordre de grandeur est très supérieur à l'incidence économique des risques de rupture. *Le souci de sécurité, qui reste essentiel, ne doit donc pas retarder une recherche accrue d'économie, d'autant qu'un ouvrage plus économique n'est pas nécessairement moins sûr.*

Il est possible que le pourcentage d'économie potentielle soit plus important sur les ouvrages de hauteur modérée pour lesquels le volume d'études et de reconnaissances préalables est relativement réduit et pour lesquels les projets pourraient évoluer plus facilement. Or, 90 % des barrages ont une hauteur comprise entre 15 et 50 m; ils représentent la moitié de la valeur globale d'investissement. Les économies sur les barrages de grande hauteur peuvent par ailleurs représenter des sommes très importantes en valeur absolue.

\*

\*\*

Le présent Bulletin traite d'abord de l'analyse et de la comparaison du coût des barrages, puis passe en revue les possibilités de gain dans les différents domaines :

- incidence des délais d'exécution;
- critères de projet, calculs et spécifications;
- procédures de décisions et relations contractuelles;
- adaptation de la conception des ouvrages classiques;
- recherche de nouveaux types d'ouvrage;
- méthodes d'exécution.

indicates an estimated overall potential saving of rarely less than ten per cent and in extreme circumstances may be as high as fifty per cent. An average target of an approximate twenty per cent saving is probably not unreasonable; this is much larger than the economic impact of the failure risk. *Although safety must always be the primordial consideration, it should not hamper a more active drive for savings* which often do not reduce safety.

The potential percentage saving may be greater for dams of moderate height for which the design and site exploration work is relatively small and project formulation can proceed more quickly. Ninety per cent of all dams are between 15 m and 50 m high and represent half the aggregate investment cost. On the other hand, savings on very high dams might represent very large amounts in absolute terms.

\*

\*\*

The Bulletin begins by discussing dam cost analysis and comparison, then reviews opportunities for savings in the different areas involved :

- impact of construction time;
- design criteria, analysis and specifications;
- decision procedures and contract relationship;
- modifications to conventional designs;
- new dam types;
- construction methods.

---

## 2. CONNAISSANCE ET ANALYSE DES COÛTS

---

Les diverses étapes de l'étude et de la réalisation d'un barrage nécessitent une estimation des coûts, en valeur absolue ou relative, d'une précision assez différente.

### 2.1. ÉTAPES DIVERSES DE COMPARAISON DES COÛTS

*a)* Pour entreprendre l'étude de préfaisabilité ou de faisabilité, un ordre de grandeur du coût est suffisant.

*b)* Pour le choix entre différentes solutions (dispositions générales, types de barrage, ouvrages annexes) les coûts relatifs précis sont plus importants que les valeurs absolues; mais ce choix est souvent effectué sur des bases économiques beaucoup plus imprécises qu'il n'est souhaitable.

*c)* La décision d'exécution n'est souvent confirmée qu'après remise et analyse des offres des entrepreneurs pour les travaux principaux, offres ne portant généralement que sur une seule solution.

*d)* Enfin, une meilleure connaissance du coût final des différents éléments des barrages devrait permettre de faire évoluer la conception et de générer des économies sur les ouvrages futurs.

### 2.2. DIFFICULTÉS SPÉCIFIQUES POUR LA COMPARAISON DES COÛTS

L'appréciation et la comparaison des coûts de barrages sont difficiles : en effet, peu de sites présentent des caractéristiques géométriques, géologiques et hydrologiques ou des conditions locales (climat, emprunts de matériaux, accès...) similaires, et ces différences influent considérablement sur les coûts unitaires.

Il est également difficile de comparer les valeurs globales ou les prix unitaires dans deux pays différents car les conditions économiques, légales, fiscales, sociales, contractuelles, entraînent des écarts importants : cependant le pourcentage du coût global affecté à chaque partie de l'ouvrage (fouilles, traitement de la fondation, maîtrise de la rivière pendant les travaux, corps du barrage, évacuateur de crue) peut être voisin pour deux ouvrages semblables de pays différents.

Les diverses méthodes d'évaluation des coûts : devis estimatifs, méthodes analytiques, évaluations globales ou semi-globales, présentent des avantages et des limites analysés ci-dessous.

### 2.3. DEVIS ESTIMATIFS

On décompose le barrage étudié en quantités élémentaires d'ouvrage terminé (bétons et coffrages divers, aciers, déblais, filtres, noyaux, recharges, forages, etc.)

---

## 2. COST REPORTING AND ANALYSIS

---

Cost estimates are required for each stage of design and construction, in absolute or relative terms, and to varying degrees of accuracy.

### 2.1. CIRCUMSTANCES SURROUNDING COST COMPARISONS

*a)* At prefeasibility or feasibility level an order-of-magnitude estimate is sufficient.

*b)* When selecting between alternative project layouts, dam types, appurtenant works, etc., accurate relative costs are more important than absolute costs; but the basis for these choices is often much more uncertain than should be desirable.

*c)* Often, the final decision is not taken until after tenders have been received and analysed for the main construction contracts; these tenders usually are based on only a single design alternative.

*d)* Lastly, analysis of actual costs of the various components of the dam should be useful for making progress in design and improving costs on future dams.

### 2.2. COST COMPARISON DIFFICULTIES SPECIFIC TO DAM ENGINEERING

It is difficult to assess and compare dam costs since few sites have similar geometries, geologies, hydrologies or local conditions such as climate, availability of borrow materials, access, etc. These differences have a substantial impact on unit costs.

It is also difficult to compare overall and unit costs of similar projects in different countries where different economic, legal, fiscal, social and contract conditions can cause great discrepancies. However, the percentages in the overall cost of similar dams in different countries for the various components such as foundation excavation and treatment, river control during construction, the dam itself, spillways, etc., may be more or less the same.

Various methods of cost evaluation : unit costs, analytical methods, and global or semi-global methods have advantages and limits which are analysed hereunder.

### 2.3. UNIT COST ESTIMATES

The most common approach in many countries is the use of quantity estimates, with the structure being split into main quantities of concrete, formwork, steel,

et on affecte à ces quantités des prix unitaires pratiqués sur d'autres ouvrages terminés ou en cours d'exécution, en cherchant à les adapter dans la mesure du possible à l'ouvrage étudié. Cette solution est souvent utilisée pour la comparaison entre diverses dispositions ou divers types de barrage. Elle présente l'avantage de pouvoir être utilisée assez tôt dans le déroulement de l'étude et elle est relativement peu coûteuse; *elle a le très grave inconvénient d'apparaître beaucoup plus précise qu'elle ne l'est en général dans la réalité*; en effet, si la plupart des quantités peuvent être estimées avec une assez bonne précision notamment pour les ouvrages principaux, l'imprécision sur les prix unitaires est souvent *très importante* pour différentes raisons : les matériaux incorporés (ciment, acier) dont les coûts sont assez bien connus ne représentent qu'une faible partie du coût total et toutes les autres composantes de prix unitaires varient considérablement pour chaque ouvrage en fonction des conditions particulières (accès, climat, emprunts et carrières, programme, cadences mensuelles, ...) et beaucoup ne sont pas proportionnelles aux quantités d'ouvrages. De même les spécifications ou la définition exacte des prix unitaires peuvent beaucoup varier entre deux ouvrages; enfin la répartition d'une partie des coûts (installations, frais généraux, amortissement du matériel) entre les différents éléments d'ouvrages peut varier, et des offres d'entrepreneurs pour un même ouvrage, d'un prix global voisin, présentent des écarts très importants sur de nombreux prix unitaires. Les écarts d'évaluation peuvent être importants pour les bétons de grande masse et peuvent varier facilement de 1 à 2 pour des déblais ou remblais meubles ou rocheux. Les écarts sur le coût global des ouvrages sont plus faibles mais peuvent rester très importants et des évaluations faites par divers organismes conduisent ainsi à des coûts très différents, sans que leur compétence technique soit à mettre en cause.

L'imprécision globale d'estimation est souvent prise en compte dans les prévisions financières par l'addition d'un pourcentage global d'aléas ou d'une provision qui peuvent tenir compte aussi des aléas en cours d'exécution : on est ainsi conduit parfois à une *surévaluation globale peu incitatrice à des économies ultérieures, ou cause d'abandon injustifié du projet*.

*La plus grande contre-indication de cette méthode est son imprécision pour la comparaison et le choix entre différentes solutions*, et il n'est pas rare que des études réalisées par deux bureaux d'études conduisent à préconiser des choix techniques différents. On risque de ne pas choisir l'ouvrage, même classique, le plus économique et, comme on ne peut justifier avec certitude l'économie d'un ouvrage original, *cette méthode est souvent très défavorable aux progrès techniques et économiques*.

## 2.4. MÉTHODE ANALYTIQUE

Dans la méthode analytique, le prix global est estimé, généralement par les entrepreneurs, à la suite d'une étude souvent complexe, adaptée spécialement à chaque projet : elle fixe les dépenses prévisibles de main-d'œuvre, matériaux intégrés aux ouvrages, consommables, amortissement et entretien du matériel, installations, frais généraux... Le prix global est réparti par l'entrepreneur dans le cadre d'un devis estimatif; cette répartition peut varier beaucoup suivant l'entrepreneur et chacun des prix unitaires peut donc être très différent suivant l'entrepreneur ou le type de barrage.

excavation, filter material, core material, shoulder material, drilling, etc. These quantities are multiplied by unit rates taken from other dams recently or still being built with some adjustment to reflect local conditions. This approach is often used in the comparison between alternative project layouts or dam types. It has the advantage of being used quite early in the design process and being relatively inexpensive; *it has the very serious drawback of appearing much more accurate and reliable than it usually is* : while most quantities can be estimated quite well, especially for the main structures, there is usually some quite *large degree of inaccuracy on unit prices* for various reasons : the construction materials (cement, steel reinforcement) whose costs are well known represent only a small part of the overall cost and all the other unit price components vary considerably with specific conditions at each dam (access, climate, borrows and quarries, construction programme, monthly progress, etc.) and are often not proportional to work quantities. Furthermore, the specifications or precise definition of what is contained in and excluded from each unit price varies considerably from one project to another. And lastly, the part of the cost which is assigned to different components (setting-up, on-costs, plant depreciation, etc.) depends on who is making the estimate and tender quotations for many unit price items vary considerably even though their overall tender is similar; there can be very large discrepancies in rates for mass concrete and unit prices for excavation and earth or rockfill can vary by a factor of 2. The error on the overall cost of the structures is usually less but can still be large and it is not surprising that estimates from different bodies can yield very different totals, without any reflection on their technical competence.

The total estimating error is often allowed for in predicting costs by adding a contingency percentage, which may also include margin for unexpected events during construction. The final result is sometimes an overestimated construction cost which is *not conducive to attempts at lowering actual costs or which may lead to the project being unjustifiably abandoned.*

*The gravest handicap to this method however is in its use for comparing and choosing between alternative designs* and it is not uncommon for analyses by different consultants to lead to recommendations for different designs. There might be failure to choose the most economical of even conventional designs and, as there is no certainty of being able to justify an innovative design, *the unit cost approach promotes neither engineering progress nor cost savings.*

#### **24. TOTAL COST ESTIMATED BY ANALYTICAL METHOD**

In the component-cost or analytical estimating method, the total dam cost is estimated, usually by contractors, from a usually complex study tailored to each project, to determine, on the basis of local conditions and the quantities in the final structures, the expected expenditure in labour, materials incorporated in the works, consumables, plant depreciation and maintenance, site installations, on-costs, etc. The cost breakdown is done differently by different contractors, so that individual unit prices may vary considerably, depending on the contractor and dam type.

Cette méthode est très fiable si elle permet un engagement sur le coût de réalisation. C'est le cas dans beaucoup de pays où elle est utilisée par les entrepreneurs en compétition : elle présente l'inconvénient d'être assez longue et relativement coûteuse. En général, *cette méthode est la seule permettant de comparer de manière précise le coût de divers projets*, de justifier des solutions relativement nouvelles et de faciliter ainsi la recherche d'économies. Malheureusement, elle n'intervient généralement qu'une fois la solution choisie et le projet défini en détail.

## 2.5. COMPARAISON GLOBALE DE PRIX AVEC DES PROJETS SIMILAIRES

Compte tenu des inconvénients respectifs des méthodes ci-dessus, on ne saurait négliger les avantages de la comparaison du coût global avec des ouvrages relativement récents de volumes et de conditions raisonnablement voisins, des corrections globales étant faites pour tenir compte des différences essentielles. Cette méthode a le grand avantage de se référer à des coûts globaux réels : elle est surtout applicable aux ouvrages de faible importance, pour lesquels les références sont plus nombreuses et les budgets d'études réduits; elle a l'inconvénient d'apparaître moins scientifique que les méthodes précédentes et l'avantage d'être peu coûteuse donc d'être au minimum utilisable en complément d'une autre méthode.

## 2.6. PARAMÈTRES REPRÉSENTATIFS DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

Il semble possible d'améliorer les résultats de cette méthode globale en décomposant le coût global en éléments principaux qui peuvent être estimés en fonction de un ou plusieurs paramètres représentatifs comme cela se fait pour d'autres ouvrages importants. Par exemple, le coût des ponts peut souvent être prévu avec une précision raisonnable en estimant séparément le tablier, dont le prix au m<sup>2</sup> est relativement constant pour une portée donnée, et les piles et fondations estimées d'après les conditions locales. Des exemples analogues existent pour des bâtiments calculés au m<sup>2</sup> ou pour les usines hydroélectriques ou thermiques dont le coût est ramené à la puissance installée.

Malgré la complexité du cas des barrages, il est probablement intéressant de développer une telle méthode en s'appuyant sur l'expérience existante dans les différents pays : une analyse peut être faite des pourcentages du coût total affectés aux différentes parties de l'ouvrage et de leur variation en fonction des divers paramètres. La précision à attendre est naturellement inférieure à celle de la méthode analytique mais sans doute comparable à celle des devis estimatifs qu'elle permet de recouper. Elle peut aussi permettre de mieux comparer assez tôt le coût des différentes solutions.

Pour obtenir une base statistique importante, une décomposition commune pourrait être la suivante :

a) Coût du corps du barrage qui représente généralement entre 1/3 et 2/3 du coût total, pourcentage croissant avec la hauteur : ce coût peut être relié pour chaque type d'ouvrage au volume total.

The analytical method is reliable if some form of undertaking on the actual construction cost is incorporated, as in many countries with competitive bidding procedures; on the other hand, it is time-consuming and relatively costly. *The analytical approach is usually the best for precise cost comparisons between different designs*, for justifying newish designs and encouraging lower costs. But it is generally used after a single alternative has been chosen and refined up to detailed design.

## **2.5. COMPARISON WITH ACTUAL COST OF SIMILAR PROJECTS**

Considering the shortcomings of the methods discussed above, it is important to consider the advantages of global comparisons with relatively recent structures of reasonably similar size and conditions, with global corrections for significant differences. This method has the great attraction of referring to actual costs. It is mainly suitable for small structures for which the number of reference dams is greater and design budget smaller. It has the drawback of appearing less scientific than the other methods, and the advantage of being cheap, so that it can at least be used as a back-up to other methods.

## **2.6. REPRESENTATIVE PARAMETERS FOR ESTIMATING PROJECT COMPONENTS**

There would appear to be an opportunity for improving the global method by breaking down the overall cost into main units to be estimated on the basis of one or more representative parameters, as is done for other major construction projects. For example, the cost of a bridge is often estimated to a reasonable degree of accuracy by costing separately the deck, whose cost per square metre is often much the same for a given span length, the piers and the foundations being estimated with reference to local conditions. Similar examples can be found in the building industry, calculated by square metre area, and hydro-electric and thermal generating stations whose cost is estimated per installed kilowatt.

Although dams are more complex, it would probably be instructive to develop such a method from existing experience in different countries. There could be an analysis of the percentages of the total cost represented by the various parts of the project and the way in which they change with various parameters. One would of course expect accuracy to be inferior to the analytical method but it would probably be comparable to the unit price method, for which it would provide a cross-check. It could as well be helpful for early comparison of alternatives.

Building a large enough statistical data base would require a standard type of breakdown, such as :

a) Cost of dam proper usually representing between one-third and two-thirds of overall cost, the percentage increasing with dam height; this cost could be referred to total volume for each dam type.

*b)* Contrôle de la rivière pendant les travaux (dérivations provisoires, batardeaux, épaissements...), dont le coût en valeur absolue ou en pourcentage peut être relié à quelques conditions hydrologiques (module de la rivière, crue décennale). Ce poste, très variable, semble représenter en moyenne de l'ordre de 10 % de l'investissement.

*c)* Fouilles des ouvrages définitifs, dont le prix peut être relié au m<sup>3</sup> excavé et à la surface. Ce poste représente rarement moins de 5 % de l'investissement total, souvent près de 10 %, parfois nettement plus.

*d)* Traitement du terrain de fondation (préparation de la surface, drainage, consolidation, y compris galeries correspondantes). Il représente naturellement un poste extrêmement variable, mais son importance prévisible pourrait peut-être se définir en fonction de la nature géologique du site ou de l'expérience de la région.

*e)* Les évacuateurs de crue ou vidanges de fond dont le coût relatif ou absolu pourrait être estimé sommairement en fonction du débit global dérivé et de la hauteur de l'ouvrage. Les chiffres sont naturellement très différents pour des barrages en béton ou en remblai.

Cette méthode est utilisée dans une certaine mesure par diverses organisations en se basant sur des données limitées. La mise en commun des connaissances correspondantes pourrait permettre de constituer un outil de travail peu coûteux et utile pour tous, des chiffres pourraient être remis pour de nombreux barrages comme d'autres le sont pour le Registre Mondial des Barrages de la CIGB.

**2.7.** Chacune des méthodes indiquées ci-dessus a ses limites qu'il est important de ne pas perdre de vue; leur utilisation simultanée ou successive peut être souhaitable, la méthode analytique, la plus précise, ne peut guère intervenir que lorsque un ou plusieurs projets ont déjà été définis en s'appuyant sur d'autres méthodes. Elle est la meilleure méthode de comparaison de coût entre plusieurs solutions.

*b)* River control during construction (diversion channel, cofferdams, dewatering, etc.) whose cost, in money or percentage terms, can be referred to a few hydrological factors (average river flow, ten-year flood). This very variable item appears to represent on average something of the order of 10 % of the capital cost.

*c)* Excavations for permanent structures, whose total cost can be based on volume and area. It rarely represents less than 5 % of total cost, often nearer 10 %, and sometimes distinctly more.

*d)* Foundation treatment (surface preparation, grouting, drainage, consolidation, including adititing); it naturally represents a highly variable cost item, but its likely importance might perhaps be defined on the basis of site geology or experience of the region.

*e)* Spillways and bottom outlets, whose relative or absolute cost could be estimated roughly from total discharge and dam height (figures being very different for concrete dams and for embankment dams).

This method is already being used to some extent by various organisations from a limited data base. Pooling experience might lead to the development of an inexpensive and convenient tool. Data could be collected for many dams, just as other data are collected for the ICOLD Register of Dams.

**2.7.** All the above methods have their limitations which must never be forgotten. It may be desirable to use them together or in turn; the most accurate i.e. analytical method may hardly be used until one or more designs have been outlined with the aid of other methods. It is the best method for comparing costs of different alternatives.

---

### 3. INCIDENCE DES DÉLAIS D'EXÉCUTION SUR LES COÛTS

---

On peut distinguer l'incidence financière correspondant à l'inflation et aux intérêts intercalaires et l'incidence technique qui est la variation du coût direct en fonction de la durée totale et de la régularité de l'exécution.

#### 3.1. INCIDENCE FINANCIÈRE DIRECTE

L'incidence financière peut être très variable, à durée égale, suivant les règles budgétaires, la rentabilité des ouvrages, les conditions de financement, l'inflation, etc. En particulier, la rentabilité très variable des ouvrages, le besoin plus ou moins urgent d'eau ou d'une énergie bon marché peuvent influencer très considérablement sur l'intérêt financier réel d'une réduction de délai.

S'il n'est pas possible de fixer de valeurs extrêmes à l'incidence financière d'un gain de délai, il n'est pas déraisonnable d'estimer que la rentabilité réelle annuelle d'un investissement est de l'ordre de 10 %; un gain d'un an sur le délai global, soit environ 6 mois de gain moyen sur l'investissement total, représente donc souvent un gain réel de l'ordre de 5 % de l'investissement. Mais on doit souligner qu'un gain de délai en début de travaux représente peu d'avantages financiers, alors qu'un gain de délai d'un mois en fin de travaux peut économiser un pour cent de l'investissement total.

Il est de toute façon nécessaire et généralement assez facile d'estimer clairement cet intérêt financier, de même que les délais minimaux et maximaux imposés par les contraintes financières ou politiques, afin de rechercher une optimisation globale en fonction de l'incidence des délais sur les coûts techniques.

#### 3.2. INCIDENCE TECHNIQUE

L'incidence du délai global sur le coût technique a deux composantes agissant en sens opposé : l'importance de certains frais mensuels fixes, une certaine réduction des coûts en fonction des cadences, poussent à réduire les délais; par contre, les délais courts nécessitent des installations plus importantes ce qui constitue une charge éventuellement très lourde, fonction de la situation géographique du chantier et des moyens disponibles dans la région. On a parfois également tendance à oublier que des délais très courts nécessitent une mise en charge du chantier onéreuse, des conséquences plus importantes des aléas, éventuellement une compétition réduite des entrepreneurs si peu d'entre eux ont les moyens nécessaires immédiatement disponibles.

---

### 3. IMPACT OF CONSTRUCTION TIME ON COST

---

A distinction can be made between the financial impact of inflation and interest during construction and the technical impact arising from changes in direct cost due to total construction time and the tempo of construction.

#### 3.1. DIRECT FINANCIAL IMPACT

The financial impact over a given period of time can vary greatly with budgetary rules, project rate of return, loan terms, inflation, etc. In particular, the (very variable) profitability of the project, urgency in the need for water or the availability of cheap power can weigh very heavily on how far any shortening of construction time will have true financial benefits.

It is not possible to set any extreme values on the financial impact of shortened construction time, but it is not unreasonable to suppose that the real annual rate of return on an investment is often of the order of 10 %; a year's saving on the total implementation time, representing about six months average saving on the total investment, often produces a real saving of the order of 5 % of the capital cost. But it must be remembered that saving time in the earlier stages of construction has little financial benefit, whereas at the end, when nearly the whole capital outlay has been committed, any month saved may represent one per cent of the whole investment.

In any event, it is necessary and usually quite simple to make a clear estimate of the financial benefit and of the maximum and minimum times imposed by financial or political imperatives in order to find the overall optimum, taking due account of the technical impact on cost.

#### 3.2. TECHNICAL IMPACT

The effect of total construction time on the technical cost involves two factors acting in opposite directions. The amount tied up in fixed monthly expenditures and the fact that faster work rates cost, to some extent, proportionately less, are incentives to complete the project faster; but this means more site plant capacity representing what may be a very heavy burden depending on the geographical position of the site and the resources of the region. There may also be a tendency to forget that very rapid construction means more cost in starting up on site, greater disruption from unforeseen events and perhaps less competitive tenders if only a few potential contractors have the necessary plant and manpower available at short notice.

Il existe donc pour chaque chantier un délai optimal pour le coût technique, variable suivant la solution choisie et même suivant l'entreprise en charge de l'exécution. Il est d'ailleurs difficile d'apprécier ce délai optimal avec précision sans une étude analytique des coûts; généralement, si l'exécution peut se dérouler de manière régulière, le coût technique varie assez peu pour une variation sensible du délai autour de l'optimum. Mais très souvent, le caractère saisonnier d'une partie des travaux, l'intérêt de la mise en eau du barrage à une période de l'année bien déterminée, la nécessité de profiter des basses eaux pour certains travaux en rivière, conduisent en fait à comparer différents programmes dont la durée diffère de près d'une année.

Il est également essentiel de rappeler que le délai utile d'exécution est très inférieur au délai global, la différence résultant des périodes souvent importantes neutralisées par diverses raisons climatiques (pluie, chaleur, gel) ou hydrologiques, ou pour les délais minimaux d'installation.

### **3.3. DÉLAI DE CONSTRUCTION OPTIMAL**

En combinant l'incidence financière des délais, assez facile à calculer, et l'incidence sur le coût technique, plus imprécise, on peut déterminer une plage assez large de délai optimal, si l'exécution et l'utilisation de l'ouvrage dépendent assez peu des saisons. Dans le cas où l'influence saisonnière est très importante, et conduit à choisir entre deux programmes pouvant différer d'un an environ, il peut être parfois intéressant de demander des offres de prix pour les deux options.

Les contraintes budgétaires ou politiques peuvent aussi contraindre à un étalement des travaux qui ne correspond pas à l'optimum économique. Il arrive aussi que des spécifications techniques imposent un délai supérieur à cet optimum. La détermination de l'incidence globale des délais sur les coûts est donc très utile mais assez complexe et variable suivant le cas.

Quelques principes toujours applicables permettent d'orienter le choix des solutions techniques et des délais d'exécution dans le sens de l'économie de coût.

#### **3.3.1. Délai trop court pour un ouvrage difficile**

Fixer un délai très serré pour un ouvrage d'exécution difficile ou soumis à beaucoup d'aléas conduit souvent à des surcoûts importants sans que le délai soit nécessairement tenu en fait; *si un programme est à la limite du réalisable, il est à la limite de l'irréalisable* : on peut risquer aussi une baisse de qualité et un risque de contentieux avec l'exécutant si les pénalités de retard sont élevées et si certains aléas se concrétisent.

#### **3.3.2. Cadences d'avancement des travaux**

En début de travaux, alors que le chantier ne dispose souvent que de moyens réduits, il est bon de prévoir des délais assez larges qui n'ont d'ailleurs que peu d'incidence financière, notamment pour les installations et la maîtrise de la rivière.

Thus for any job, there is an optimum construction time for the technical cost depending on the selected design and even the main contractor. It is not easy to estimate with any accuracy without an analytical cost study; usually, if work can proceed smoothly, there is very little change in the technical cost within quite a wide range around the optimum construction time, but it is often the case that the seasonal nature of some of the work, the advantage of filling the reservoir at a precise period of the year and the need to carry out some work in the river channel in the low flow season means that the construction programmes compared differ by about one year.

It is also important to remember that the effective construction time is much less than the total calendar time, the difference being due to the sometimes long periods of idleness dictated by the climate (rainfall, hot weather, sub-zero temperatures), river flow pattern, or the time required for setting up on the site.

### **3.3. CONSTRUCTION TIME OPTIMISATION**

By combining the financial impact, which is quite easily calculated, and the less precise technical impact, one arrives at a fairly wide envelope for the optimum construction time if site work and project operation are more or less independent of seasonal factors. In seasonally-dependent circumstances, where the choice is between two programmes differing by one year or so, it may be wise to invite tenders for both alternatives.

Budgetary and/or political constraints may also demand a longer construction time than the cost optimum. It may also happen that the specifications impose a longer period than the optimum. Determining the overall impact of construction time on cost is thus a very useful but quite complex and very variable task.

A few basic principles are still current for guiding the choice of design and construction time towards cost savings.

#### **3.3.1. Too short construction time for difficult job**

A very tight construction schedule for a difficult construction job or a project with a high contingency factor often leads to serious overruns on cost without the completion time necessarily being met entirely; *if a job is just about possible, it might equally be just about impossible*, and there is also a danger of poor workmanship and disputes with the contractor if penalty payments are high and some contingencies materialise.

#### **3.3.2. Construction progress**

At the start when constructional resources on site are often limited, it is wise to leave plenty of time; this has little financial impact, such as regards site installations and river control for example. But when the job is nearing completion and

Par contre, les délais financièrement très coûteux en fin de chantier lorsque les investissements sont déjà réalisés doivent être réduits le plus possible, notamment par la conception des ouvrages correspondants (crête des ouvrages, clavage des voûtes, masques sur remblais, coupures finales de rivières...) et par l'utilisation maximale des moyens importants et bien rodés disponibles à cette époque.

### 3.3.3. Autres facteurs importants

a) La régularité d'utilisation des moyens d'exécution (personnel et matériel) est un élément essentiel du coût global : la disposition générale des ouvrages, le choix du type de barrage et le programme doivent la prendre en compte, en s'adaptant le mieux possible aux conditions climatiques et hydrologiques locales. Réduire de 6 à 4 mois par an l'interruption saisonnière des travaux peut réduire le coût global de plus de vingt pour cent et, dans des climats très froids ou très pluvieux, les remblais en enrochement peuvent être moins coûteux que des remblais en terre.

b) Les contraintes pouvant peser sur les délais (spécifications sur cadences ou vitesse de montée, délais intermédiaires) doivent être réduites le plus possible car elles peuvent être en fait très coûteuses.

c) Il ne faut pas perdre de vue qu'un chantier n'est jamais totalement à l'abri d'un retard éventuel (aléas de sol, de crues, de climat, accidents mécaniques, mouvements sociaux...). Si les conséquences d'un tel retard peuvent inclure le risque de destruction par submersion du barrage ou d'un batardeau en construction avec risques sérieux pour les populations aval, le projet doit être modifié ou une marge importante prévue sur le programme. *Ce risque grave en cours de chantier est parfois très sous-estimé par rapport au risque équivalent de l'ouvrage terminé.* De même, si un retard faible risque d'entraîner un retard d'un an par suite des conditions hydrologiques ou climatiques, des adaptations du projet, ou une marge importante sur les programmes, ou un accroissement des moyens doivent être prévus.

d) De bonnes et rapides communications et une bonne coopération entre le Projeteur, l'Entrepreneur et l'organisme chargé de la Supervision des travaux sont un élément essentiel du respect des programmes et donc du succès commun, notamment pour une adaptation efficace, *rapide* et équitable aux imprévus et aux aléas en cours d'exécution.

most of the cost has already been committed, the work should proceed briskly; this can be achieved by proper design of the structures then being built (crest works, dam block grouting, watertight facings of fill dams, river closure, etc.) and by making the best use of the greater amount of plant and manpower available at that time, when it has reached best efficiency.

### 3.3.3. Other important factors

a) Regular, uninterrupted employment of plant and manpower is a prime factor in overall cost which must be considered in the general layout of the works, choice of dam type and construction programme, with proper reference to local climate and hydrology. Reducing seasonal interruptions from six to four months per year can reduce overall cost by more than twenty per cent and, in very cold or wet climates, rockfill can be cheaper than earth fill.

b) Constraints affecting construction time (requirements in the specifications regarding rates or thickness of fill placement or partial completion times) must be kept to a minimum since they can be very expensive.

c) It must be remembered that any job may be subject to delays from unexpected conditions in the ground, floods, weather, breakdowns, strikes, etc. If they might have serious consequences, such as the risk of overtopping and destruction of the partially completed dam or cofferdam with serious risks to the public downstream, the design must be amended or ample margin left in the programme. *The failure risk factor during construction is often markedly underestimated as compared with the risk from the finished structure.* In the same way, if there is a danger of a small delay allowing hydrological or weather conditions to push back the programme by one year, the design needs amending, or a greater margin must be left in the programme, or more plant and labour is needed than theoretically necessary.

d) Good communications and cooperation between designer, contractor and works supervisor are essential for meeting contract dates and for the success of the project for all concerned, in order that unforeseen events can be settled *quickly*, efficiently and fairly.

---

## 4. CRITÈRES DE PROJET, CALCULS, SPÉCIFICATIONS

---

### 4.1. INCIDENCE DES CRITÈRES DE PROJET ET DES CALCULS SUR LA SÉCURITÉ ET LE COÛT

Les ressources financières disponibles pour la construction d'un barrage sont toujours limitées. La sécurité atteinte, qui a fait de grands progrès depuis une cinquantaine d'années, n'est pas et ne sera jamais parfaite. Le problème posé, comme pour beaucoup d'autres réalisations humaines, semble en fait se présenter ainsi : Est-il possible, par une meilleure analyse des risques et des coûts, et une meilleure répartition des dépenses entre les éléments de l'ouvrage, d'améliorer la sécurité et de réduire le coût?

Les idées exposées respectivement par Pierre Londe et Aldo Marcello dans les notes jointes au présent Bulletin (Annexes A et B) ont servi de base aux suggestions ci-après qui associent l'analyse des coûts à l'optimisation de la sécurité.

#### 4.1.1. Rapport entre l'application de règlements précis et la sécurité

Certains ouvrages, plus répétitifs, par exemple les ponts ou les bâtiments qui sont soumis à des sollicitations bien connues et sont constitués de matériaux de qualité relativement constante, peuvent être conçus avec sécurité à partir de règlements précis, basés sur un raisonnement déterministe; ils utilisent normalement des coefficients de sécurité qui tiennent compte de la dispersion de qualité des matériaux et des imprécisions sur les calculs ou les sollicitations.

Une telle solution est généralement inapplicable dans le domaine des barrages pour les raisons clairement exposées par P. Londe :

« Il est faux de croire, et malheureusement certains le croient encore, que pour assurer la sécurité d'un barrage il suffit de suivre scrupuleusement les règlements, les normes, les standards et autres codes qui ont été publiés dans de grands pays industrialisés et qui sont imposés partout.

En réalité, on constate que *presque toutes les catastrophes se sont produites sur des ouvrages réglementairement acceptables.*

Les barrages sont intimement dépendants de leur fondation, et s'ils sont en remblai ils sont au surplus faits d'un matériau naturel. C'est dire que les problèmes géotechniques dominent. Or tout problème géotechnique a des données qui ont les propriétés suivantes :

a) Caractère dispersé et incertain, dans l'espace des caractéristiques des sols et des roches.

b) Imperfection des mesures : nombre forcément limité et erreurs instrumentales.

c) Caractère dispersé et incertain des sollicitations dans le temps.

---

## 4. DESIGN CRITERIA, ANALYSIS AND SPECIFICATIONS

---

### 4.1. IMPACT OF DESIGN CRITERIA AND ANALYSIS ON SAFETY AND COST

The money available for building a dam is always limited; dam safety which has improved spectacularly over the last fifty years is not and never can be absolute. As with so many other human undertakings, the problem seems to be : is it possible, by means of better risk and cost analysis and a better allocation of funds to the various components of the structure, to improve safety while at the same time reducing the cost?

The ideas put forward by Pierre Londe and Aldo Marcello in the papers accompanying this Bulletin (Appendices A and B) were the basis for the suggestions hereunder, which deal with cost analysis and safety optimisation in combination.

#### 4.1.1. Relationship between adherence to standards and dam safety

Some standard structures like bridges or buildings experience well documented loads, are built of materials of substantially unvarying quality, can be safely designed from precise design rules based on deterministic reasoning, and make use of safety factors allowing for random variations in materials quality and uncertainties in computation and loads.

This approach is not usually suitable for dams, for the reasons clearly outlined by P. Londe.

“ It is wrong to believe, as unfortunately some do still believe, that a dam can be made safe simply by scrupulously following regulations, standards, rules and codes of practice issued by the leading industrialised countries and adopted all over the world.

In fact, *nearly all disasters have occurred at dams meeting the regulation requirements.*

Dams are intimately associated with and dependent on their foundations and embankment dams are also made of a naturally-occurring material. In other words, geotechnical factors predominate. And any geotechnical problem has the following features :

- a) The properties of any soil or rock are non-uniform and uncertain.
- b) Measurements are fallible because necessarily limited in number and subject to instrumental error.
- c) Loads vary in time in a non-uniform and uncertain manner.

d) Imperfection du modèle mécanique.

e) Grand nombre de paramètres.

Cet ensemble fait que l'ingénieur doit résoudre des problèmes complexes dont les données sont incertaines, et il ne peut les traiter que par des approximations elles-mêmes incertaines. »

L'application pure et simple de règlements et de coefficients de sécurité à des ouvrages dont les composantes et les sollicitations diffèrent très largement *ne garantit en fait ni la sécurité ni l'économie*; en effet :

a) Les coefficients de sécurité, fixés par les codes pour un ouvrage type, peuvent être trop élevés ou trop faibles pour l'ouvrage étudié; par ailleurs, ainsi que le rappelle P. Londe « les statistiques ont montré que seulement 15 % des ruptures de barrages en terre étaient attribuables à des mécanismes justiciables d'un coefficient de sécurité, toutes les autres résultant de mécanismes non calculables (érosion interne, submersion...) ».

b) Les caractéristiques locales (géométrie, géologie, matériaux...) peuvent être plus favorables que pour un ouvrage type : l'application stricte de règlements ou de modes de calcul standards peut alors conduire à des dépenses inutiles très importantes sans amélioration réelle de la sécurité.

C'est donc fort justement que le Comité des Calculs et de la Conception des Barrages dans son rapport sur la Philosophie du choix des critères de projet de barrages (Bulletin CIGB n° 61) « préconise que les codes (normes ou règles de référence) soient utilisés par les ingénieurs en tant que recommandations et non comme un ensemble de règles rigides à suivre aveuglément, sans réfléchir aux modifications qui peuvent être justifiées dans certains cas ».

Ces difficultés relatives à l'approche de la sécurité des barrages conduisent de plus en plus à l'adoption de méthodes ou tout au moins de modes de pensée probabilistes ou semi-probabilistes. Ces méthodes, qui s'appliquent déjà généralement dans l'évaluation des crues à prendre en compte, peuvent conduire à des calculs trop complexes si on cherche à les étendre à tous les paramètres intervenant dans l'ouvrage, mais peuvent être utilisées de manière réaliste et féconde si on ne prend en compte que les paramètres les plus importants que les méthodes probabilistes permettent d'ailleurs de déterminer.

Par ailleurs, il est important de souligner, comme le fait Aldo Marcello, qu'un même supplément de coût (ou d'efforts dans un sens plus large) peut avoir un effet très variable sur la sécurité en fonction de l'avancement du projet de l'ouvrage.

#### **4.1.2. Comparaison de chaque mode de défaillance à un même niveau de sécurité**

Une optimisation partielle des coûts, à sécurité égale, se fait souvent dans la définition de certains éléments de l'ouvrage; par exemple, on compare le coût relatif d'un accroissement du débit de l'évacuateur de crue et celui d'une augmentation du stockage de la crue, mais il semble que cette optimisation soit souvent trop limitée, probablement parce que l'analyse des coûts n'est pas toujours facile ou parce que les règlements ne permettent pas assez de flexibilité.

Il semble qu'il y aurait beaucoup à gagner en développant ces optimisations par une décomposition, même approximative, du coût des ouvrages entre ses éléments principaux et une analyse sommaire de la variation de ces coûts suivant les variations de paramètres (volume, forme, spécifications, contraintes...). Il est alors souvent

d) Mechanical models are imperfect.

e) A large number of parameters are involved.

All this together means the engineer must solve complex problems whose data are uncertain, and he can only approach them through approximations which are themselves uncertain. ”

Simply following rules and applying safety factors to structures whose materials and loads vary so widely *is no guarantee of either safety or economy* because :

a) Safety factors set by regulations for the typical structure may be too high or too low for the structure under design; and anyway, as pointed out by Londe : “ Statistics show that only 15 % of failures of earth dams were attributable to mechanisms amenable to the safety factor concept, all the remainder being caused by non-computable mechanisms (internal erosion, overtopping, etc.). ”

b) Local features (geometry, geology, materials, etc.) may be more favorable than for a typical structure and strict application of standard specifications or analysis methods would lead to the needless and heavy expense without any real improvement in safety.

The Committee on Analysis and Design of Dams was therefore entirely justified in its Philosophy for Selecting Dam Design Criteria (ICOLD Bulletin n° 61) : “ Codes should be used by the engineering profession as guidelines for dam design rather than as rigid rules which should be followed without question and without consideration of variations which may be justified in particular cases.”

These difficulties in the approach to dam safety are increasingly leading to the adoption of methods or at least ways of thinking that are probabilistic or semi-probabilistic. They are already widespread in estimating floods for design purposes but may involve over-complex calculations if one attempts to generalise them to cover all the parameters involved in a dam; they can however be used realistically and fruitfully by considering only the more important parameters, which can in fact be selected by probabilistic methods.

As mentioned by Aldo Marcello, it is also important to stress that the same extra commitment of funds (or effort in the widest sense) can have very different effects on safety depending on the stage reached in design.

#### **4.1.2. Comparison at same safety level for each failure mode**

Partial cost optimisation, for a given level of safety, is often undertaken when designing certain parts of the project; for example, a comparison is made, in relative terms, of the cost of increasing spillway capacity or dam freeboard to detain part of the incoming flood, but this process would appear to be often too restricted, probably because cost analysis is not always easy or because regulations or codes do not leave enough margin of flexibility.

There would seem to be great benefits from making more use of such optimisations, by making even an approximate breakdown of project cost between the main items and a summary analysis of how these costs change with changing parameters (volume, shape, specifications, stresses, etc.). It is often possible, by this approach,

possible, pour chacun des modes de rupture envisageables, de comparer, à sécurité égale, les variations de coût résultant de la variation des divers paramètres afin d'optimiser le projet et de rechercher ainsi si des conceptions différentes des conceptions habituelles ne sont pas nettement plus économiques.

#### **4.1.3. Comparaison à un même niveau d'optimisation global pour différents types de défaillances**

Il est également possible, dans bien des cas, d'estimer sommairement, pour plusieurs modes de rupture, les surcoûts de diverses solutions pour une même amélioration du risque afin de rechercher l'optimisation globale coût-sécurité. Par exemple, la sécurité réelle d'un barrage-poids en béton peut être parfois améliorée, tout en réduisant son coût par une réduction des spécifications, en augmentant son volume, en arquant le tracé, en améliorant le drainage. De même, il n'est pas rare de consacrer des surcoûts trop élevés à des spécifications excessives, tout en courant des risques sur les évacuateurs de crue, le traitement des fondations, le contrôle de la rivière pendant les travaux, etc.

Il paraît donc souvent possible de mieux moduler les efforts financiers sur les différents éléments de l'ouvrage en fonction des gains de sécurité correspondants. Les analyses à faire ne paraissent pas irréalistes à condition de ne pas chercher une trop grande précision et de se limiter aux éléments principaux. Systématiser une telle approche, en complément des études habituelles, paraît susceptible d'orienter de façon très positive beaucoup de projets futurs.

## **4.2. INCIDENCE DES SPÉCIFICATIONS SUR LES COÛTS**

### **4.2.1. Effets nocifs d'un excès de spécifications**

Les règlements et spécifications techniques ont pour but une amélioration et une garantie de qualité, mais l'excès des spécifications entraîne parfois des surcoûts élevés par rapport aux gains de qualité correspondants.

De nombreux maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre et ingénieurs conseils sont tout à fait conscients des surcoûts correspondants (tout en les sous-estimant parfois). Les spécifications sont parfois adaptées efficacement, mais les procédures contractuelles et la définition des responsabilités ne leur donnent pas toujours la possibilité d'intervention ou l'incitation souhaitables pour optimiser.

Les spécifications sont donc souvent inutilement coûteuses pour des raisons directes ou indirectes. Par exemple, des spécifications établies pour des ouvrages très sollicités ou à risque élevé sont appliquées à des ouvrages à faibles sollicitations et sans risques ou étendues sans nécessité à des ouvrages provisoires (installations, dérivations, batardeaux). Certaines spécifications sont imprécises (« de la meilleure qualité possible, à la satisfaction de l'ingénieur ») ou trop restrictives (agrément d'un seul matériel désigné, les autres étant soumis à une approbation aléatoire...).

On cumule souvent inutilement des spécifications détaillées portant sur les performances des ouvrages terminés, sur les caractéristiques des matériaux de base, sur les méthodes d'exécution, ...

to take a set level of safety and compare the effect on cost of changing various parameters, for each mode of failure. This serves to optimise the design and indicates whether unconventional or “ non standard ” alternatives would not be substantially cheaper.

#### **4.1.3. Comparison at same optimisation level for several failure modes**

Another possibility in many cases is to make a rough estimate, for several failure modes, of the extra cost for a given improvement in the safety, in an attempt at a combined cost/safety optimisation. For example, the actual safety can probably be improved on some gravity dams while still lowering their cost, by relaxing specifications, slightly increasing the concrete volume or arching the dam, providing better drainage, etc. Conversely, it is not uncommon to produce excessive extra cost for over-stringent specifications while leaving a relatively high degree of risk on spillways, foundation treatment, river control during construction, etc.

It would thus seem possible to refine the way in which extra funds are allocated to the various components of the dam in the light of expected improvements in safety. The analyses involved do not seem unrealistic if one does not seek too much precision in the results and if only the main components are considered. A systematic approach of this sort, used in conjunction with conventional methods, would seem likely to have a very positive influence on future designs.

## **4.2. IMPACT OF SPECIFICATIONS ON COSTS**

### **4.2.1. Harmful effect of overdetailed specifications**

Codes and specifications are intended to improve and ensure a required standard of quality but the tendency for them to become too comprehensive can push up costs without commensurate gains in quality.

Many owners, contractors and consulting engineers are quite conscious of the extra costs involved (although they sometimes underestimate them) and specifications are sometimes efficiently tailored, but contract procedures and the breakdown of responsibilities do not always allow or encourage them to optimize.

Specifications may thus be needlessly costly for direct or indirect reasons. For example, specifications for heavily loaded or high risk structures may be applied to permanent structures subject to light loads with a low level of risk, or needlessly extended to cover temporary structures like site installations, diversion channels and cofferdams. Some specifications are imprecise (“ best quality ”, “ to the Engineer’s satisfaction ”, etc.) or too restrictive (as when only one maker’s equipment is designated, other makers being subject to approval which may be withheld).

Some specifications are also needlessly detailed or over-restrictive, dealing with the performance of completed works, properties of basic constructional materials, construction methods, etc.

Des spécifications apparemment peu coûteuses peuvent empêcher tôt ou tard des types d'ouvrages innovateurs ou des méthodes d'exécution économiques.

Il peut arriver qu'un trop grand nombre de spécifications nuise aussi à la sécurité, leur observation scrupuleuse se révélant irréaliste en pratique, notamment pour assurer la tenue des délais, et les exécutants et les personnels de contrôle, ainsi amenés parfois à ne pas respecter toutes les spécifications, peuvent ne pas attacher l'importance nécessaire aux spécifications essentielles.

Si l'on reconnaît généralement qu'il existe plutôt un excès de spécifications, il est difficile d'établir pour chaque ouvrage celles qui sont strictement nécessaires à la sécurité et à la qualité. On peut cependant proposer quelques orientations permettant des économies.

#### **4.2.2. Possibilités d'économies**

Lors de l'établissement de nouvelles spécifications générales ou particulières, ne pas seulement ajouter des spécifications, mais également en supprimer ou réduire leur rigueur si cela conduit à des économies ou des simplifications. Laisser la possibilité de dérogations à certaines spécifications générales.

— N'imposer que peu de spécifications aux ouvrages provisoires qui peuvent souvent être laissés sous la responsabilité des entrepreneurs (installations, dérivations provisoires, batardeaux, ...).

— Pour chaque barrage, revoir complètement les spécifications s'appliquant aux éléments de l'ouvrage qui représentent une part importante du coût total. Il semble possible notamment, sans nuire à la sécurité, de réaliser souvent des économies importantes sur les spécifications suivantes : nettoyage des fouilles, enrochements ou remblais perméables, coffrages, bétons de masse et bétons compactés, traitement des fondations.

— Si une préparation soignée des fondations sous les noyaux, masques, filtres et ouvrages en béton est un élément essentiel de la sécurité, il n'en est pas de même sous les recharges qui représentent souvent la plus grande surface de fondation. Il existe des chantiers où les nettoyages correspondants sont coûteux et inutiles.

— L'emploi des enrochements dans les barrages s'est largement développé ces dernières décennies grâce aux progrès techniques sur l'abattage et aux matériels beaucoup plus performants. Leur coût représente souvent 25 à 30 % du coût global d'un ouvrage. Les spécifications, qui ont d'ailleurs beaucoup évolué, ne permettent pas toujours d'obtenir l'économie maximale permise par les carrières et les matériels disponibles. Les seules qualités demandées généralement à la plupart des enrochements sont une perméabilité minimale, un tassement raisonnable, un angle de frottement fiable en fonction duquel est déterminé le profil. Comme le matériau et les carrières ne sont jamais identiques, les spécifications doivent être adaptées à chaque cas et tenir le plus grand compte de l'économie : le coût unitaire peut varier du simple au double en fonction des choix de carrières, des granulométries qui doivent être bien adaptées aux conditions locales et le moins contraignantes possible, permettant de réduire les tris, les traitements et les pertes. Il peut souvent

Sometimes, specifications which do not appear to increase cost may eventually hamper the introduction or development of new dam types or economical construction methods.

Over-specification may even impair safety if too scrupulous adherence is impracticable to meet completion dates; then if construction and supervisory staff do not comply with the whole of the specifications, they may disregard just those items which are important.

Although it is widely recognised that specifications tend to be excessive, it is still a difficult task to decide what is strictly necessary for the safety and quality of a structure. Some guidelines to savings are however suggested hereunder.

#### **4.2.2. Potential savings**

When drafting new general or special specifications, do not just add new requirements but delete or relax as required for savings and simplification. Leave a possibility for waivers to certain general specifications.

- Write few specifications for temporary works which can be often left to the responsibility of the contractors (e.g. site installations, diversion channels, cofferdams, etc.).

- For each dam, completely review the specifications for the components of the dam representing a major part of the total cost. For instance, major savings appear feasible without impairing safety when scaling down excavations, rockfill or pervious fill, formwork, mass concrete and rollcrete and foundation treatment.

- While careful foundation preparation under cores, watertight upstream facings, filters and concrete structures is essential for safety, this is not so for shoulders, which usually represent the largest foundation area. Such foundation preparation on some jobs is costly and unnecessary.

- Rockfill has been increasingly used in dams over the last few decades because of progress in quarrying methods and more efficient plant. It may often represent 25-30 % of total cost. Although specifications have changed considerably, they do not always permit the full savings offered by available quarries and plant. The only thing usually needed of most rockfills is minimum permeability, reasonable settlement and an angle of internal friction which determines the profile. As no two materials or quarries are identical, the specifications must be tailored to each individual case and focus on economy. Unit costs can vary by a factor of two with the choice of quarry and rock grading, which must suit local conditions and be as unrestrictive as possible so as to keep down sorting, processing and wastage. It may often be preferable to flatten the profile and accept a lower angle of internal friction if unit prices are appreciably reduced thereby. Ease of access to quarries and dam and convenient quarry geometry for operation have considerable impact on cost. Some of these remarks also apply to gravel earthfill.

être préférable d'adoucir un peu les profils en admettant un angle de frottement plus faible, si les prix unitaires peuvent être notablement abaissés. La facilité d'accès en carrière et sur le barrage, la commodité d'exploitation des carrières en fonction de leur géométrie ont une incidence considérable sur le coût. Une partie des observations ci-dessus s'applique aussi aux recharges perméables en matériaux meubles.

— Les spécifications imposées aux coffrages, notamment en matière de précision et de fini, sont souvent inutilement onéreuses : pour les zones non vues en service les spécifications doivent être minimales. Le coffrage des galeries intérieures est coûteux, il est souhaitable d'en simplifier les formes (rectangulaires si possible, quitte à rajouter des aciers), les tolérances et la finition, et d'admettre l'utilisation de galeries préfabriquées.

Pour le coffrage des zones non exposées aux écoulements hydrauliques, les spécifications et dispositions prévues tiennent compte de l'aspect recherché, mais il paraît très difficile d'éviter, quelles que soient les précautions prises, des irrégularités apparentes (taches de ciment, d'humidité, changements de coloration); l'aspect de la plupart des barrages après quelques années, à la distance où on les voit, ne dépend guère du fini ou des tolérances imposées sur les coffrages.

Une solution intéressante et peu coûteuse peut consister à souligner les joints et reprises de coffrage, au lieu de les cacher, ce qui divise régulièrement les grandes surfaces vues et atténue les défauts d'aspect inévitables. Un autre point important en matière de coffrage est de laisser, autant que possible, à l'entrepreneur le choix des hauteurs de levées (en tenant compte des problèmes thermiques).

Les zones soumises aux écoulements hydrauliques justifient naturellement des spécifications spéciales qui doivent cependant rester réalistes : on ne peut espérer résoudre avec sécurité les problèmes de cavitation sous grande vitesse en imposant sur des grandes surfaces inclinées et souvent courbes des tolérances d'exécution à la limite du réalisable.

— Si quelques barrages en béton ont connu des problèmes importants dus à des réactions chimiques ou des problèmes généralement mineurs de fissurations, *il ne semble pas y avoir eu de ruptures d'ouvrages dues à la qualité de réalisation du béton* : cependant, depuis qu'on réalise des barrages en béton, les spécifications et les contrôles correspondants n'ont cessé de s'accroître et portent aussi bien sur les constituants et les méthodes que sur les performances. Si l'accroissement de coût dû à chaque spécification peut être relativement limité, leur simultanéité est coûteuse, soit directement, soit par l'impossibilité en résultant d'utiliser certains matériels ou certaines méthodes économiques. Comme le coût du béton de masse représente près de 50 % du coût global des barrages voûtes ou poids, il paraît souhaitable dans bien des cas de simplifier les spécifications correspondantes en recherchant l'économie maximale permise par les sollicitations de l'ouvrage et les conditions locales.

— Le béton compacté au rouleau (BCR) semble orienté actuellement dans deux voies très différentes, soit vers l'amélioration des qualités techniques du béton classique sans réduction très importante du coût, voie intéressante pour certains ouvrages de grande hauteur, soit vers la recherche du prix minimal, avec réduction des performances en résistance, et éventuellement en étanchéité.

Les spécifications doivent être clairement adaptées au but recherché et il existe un risque très important que les grandes possibilités économiques et techniques

— Requirements for formwork, regarding accuracy and finish in particular, are often needlessly burdensome. Specifications should be kept to a minimum for areas not visible in operation. Forming dam galleries is expensive and it is better to keep shapes simple (rectangular if possible even if extra steel has to be added), relax tolerances and finish requirements, and permit use of prefabricated galleries.

Specifications and arrangements for forms in areas not exposed to flowing water must take account of the required appearance, but whatever measures are taken, it seems difficult to avoid unsightly cement stains, damp patches and colour changes, and the appearance of most dams after a few years, from the distance they are viewed at, does not really depend on the finish and tolerances stipulated for the formwork.

In many cases, an attractive and inexpensive solution might be to pick out formwork edge lines and joints instead of trying to hide them, so as to break up large visible areas into a regular pattern and attenuate unavoidable defects in appearance. Another important point with formwork is leaving lift heights to the contractor as far as possible (subject to thermal analysis).

Areas in contact with flowing water obviously require strict specifications but these must be realistic. High velocity cavitation problems cannot be expected to be solved safely by specifying just-feasible working tolerances on large sloping and often curved surfaces.

— While some concrete dams have had major problems from chemical reactions or usually minor cracking problems, *there do not seem to be any failures from poor concrete workmanship*. However, ever since concrete dams have been built, the specifications and supervision thereof have steadily increased and cover materials and methods as well as performance. While the cost increase due to each individual requirement may be small, they are costly when combined, either directly, or because of the resulting exclusion of certain economical methods or types of plant. Since mass concrete represents nearly 50 % of the overall arch or gravity dam cost, it seems desirable in many cases to simplify the specifications to arrive at maximum economy compatible with structural loads and local conditions.

— Roller compacted concrete (RCC) appears to be going in two very different directions at the present time, towards improved technical quality over conventional concrete without very large reduction in cost, which is attractive for some high dams, or towards minimum cost with reduced strength performance and possibly reduced watertightness. Specifications must clearly reflect the desired objectives and there is a very real risk of the great economic and technical potential offered by rollcrete being lost through burdensome and stifling specifications.

offertes par le béton compacté soient perdues par l'application de spécifications inutilement onéreuses et stérilisantes.

On ne peut mieux faire à ce sujet que citer le rapport des États-Unis figurant en annexe (Annexe C) :

« Le béton compacté a ou avait la possibilité d'économies considérables pour de nombreux projets. Le danger actuel est que *le développement des spécifications puisse ruiner facilement ses possibilités économiques.* »

#### **4.2.3. Sécurité sur les chantiers**

Certains chantiers sont très dangereux pour le personnel qui y travaille. Cela peut être dû au site ou au projet, mais l'entrepreneur en est souvent le principal responsable, par suite d'une mauvaise organisation ou d'une importance trop faible attachée à ce problème.

Des spécifications particulières et des règles contractuelles doivent s'appliquer sur ce point. L'expérience de nombreux pays montre qu'elles permettent d'améliorer non seulement la sécurité du personnel, mais le coût réel de construction.

This cannot be illustrated better than by quoting the appended USCOLD report (Appendix C) :

“ Rollcrete has or had considerable savings potential for many projects. The present danger is that *the development of specifications might easily ruin its economic potential.* ”

#### **4.2.3. Workers safety during construction**

Some jobsites are very dangerous for the workmen. This can be due to dam site or design but the contractor is often responsible because of poor organisation or lack of commitment to safety.

Relevant specifications and contractual rules are necessary. Experience in many countries shows that due care on this point improves construction cost as well as reducing accidents.

---

## 5. POSSIBILITÉS D'ÉCONOMIES DANS LES PROCÉDURES ET RELATIONS CONTRACTUELLES

---

### 5.1. ORGANISATION GÉNÉRALE

Les procédures administratives et contractuelles nécessaires pour la réalisation d'un barrage, la répartition des responsabilités et les relations entre les intervenants varient beaucoup d'un pays à l'autre et même à l'intérieur d'un pays, mais le souci de la sécurité et la défense de l'environnement conduisent le plus souvent à des procédures longues et complexes; celles-ci entraînent fréquemment une augmentation de contraintes d'un coût élevé, nuisent à la recherche de solutions économiques et empêchent souvent toute innovation. Trois rapports nationaux ci-joints (États-Unis — Annexe C —, Espagne — Annexe D — et Italie — Annexe B —) qui abordent ce problème de manière très intéressante résument cette situation assez générale d'une manière expressive :

« Il y a généralement une ou plusieurs contraintes imposées sur une organisation, ce qui empêche la prise en compte de toutes les solutions industrielles disponibles. »

« Il y a généralement des retards qui sont presque toujours injustifiés. »

« Dans la plupart des cas, les charges résultant de facteurs administratifs se sont toujours révélées plus contraignantes que celles résultant de précautions conceptuelles ou constructives, bien que là aussi une simplification soit sûrement souhaitable. »

En dehors des organismes extérieurs qui défendent les intérêts des États, des tiers ou des financiers, la réalisation d'un barrage engage le plus souvent quatre responsabilités principales pouvant entraîner quatre intervenants distincts :

*a)* La maîtrise d'ouvrage, assurée par le responsable juridique et administratif, organisme public ou privé, souvent propriétaire de l'ouvrage.

*b)* Les études, souvent confiées en tout ou en partie à un bureau d'ingénieurs conseils.

*c)* L'exécution des travaux, généralement confiée à un entrepreneur indépendant.

*d)* La supervision des travaux, confiée à un organisme indépendant ou à l'ingénieur conseil, ou réalisée directement par le maître d'ouvrage avec parfois une assistance extérieure.

Il n'est pas question d'analyser ici en détail l'intervention des différents organismes extérieurs ou les relations entre les quatre intervenants directs, mais on cherchera seulement à identifier les raisons principales d'augmentation de coût à divers stades et à suggérer des possibilités réalistes d'économies, en étudiant successivement :

---

## 5. POTENTIAL SAVINGS IN CONTRACT PROCEDURES AND RELATIONS

---

### 5.1. GENERAL ORGANISATION

The administrative and contractual procedures involved in building a dam, allocation of responsibilities, and relationships between the parties vary greatly from one country to another and even within any one country, but commitment to safety and environmental protection often result in time-consuming and complex procedures. This frequently leads to very costly increases in imposed conditions, hampers the search for economical alternatives, and often prevents any sort of innovation. Three of the appended national reports containing a very interesting discussion on this topic (USA — Appendix C —, Spain — Appendix D — and Italy — Appendix B —) sum up this quite widespread situation very expressively :

“ There are usually one or more constraints imposed on an organization which inhibit the full consideration of all the alternatives available to the industry. ”

“ Delays usually occur that are nearly always unjustified. ”

“ In most situations charges induced by administrative-bureaucratic factors have always proved more burdensome than those due to an excess of design or constructional precautions, even though a simplification in this sense is surely desirable. ”

Leaving aside outside organisations defending the interests of the State, financiers and others, building a dam usually involves four areas of responsibility which might be embodied in four separate parties :

*a)* Overall responsibility for the project, assumed by a legal and administrative entity or executive agency, a public or private organisation which is often also the owner of the dam.

*b)* Design, often awarded in whole or part to a firm of consulting engineers.

*c)* Performance of the works, generally by an independent contractor.

*d)* Supervision of construction, awarded to an independent body or the consulting engineer, or undertaken directly by the executive agency, sometimes with outside assistance.

We shall not make a detailed analysis of how various outside bodies are involved or of relations between the four parties. We shall simply attempt to identify the main reasons for cost increases at various stages and suggest realistic opportunities for making savings, by examining, in turn :

- 1) L'intervention des organismes extérieurs.
- 2) Le déroulement des études et le choix du projet.
- 3) L'attribution des travaux.
- 4) L'exécution et la supervision des travaux.

## 5.2. INTERVENTION D'ORGANISMES EXTÉRIEURS

L'intervention d'organismes extérieurs ayant en droit ou en fait pouvoir de décision ou de veto correspond à la défense d'intérêts légitimes; sans vouloir limiter leur rôle, ni mettre en cause leurs capacités et leur souci général d'efficacité, il paraît utile de rappeler certains inconvénients résultant notamment de l'intervention simultanée ou successive de plusieurs organismes.

*a)* Procédures qui peuvent être très lentes : il est surtout essentiel qu'elles ne créent pas de retard durant la construction.

*b)* Coûts réels des contraintes ou spécifications supplémentaires imposées, qui sont souvent plus importants à l'exécution qu'ils n'apparaissent initialement, notamment parce que les intervenants directs n'ont pas toujours le pouvoir de les adapter aux conditions réelles d'exécution.

*c)* Nécessité de figer relativement tôt et dans le détail les projets pour les soumettre aux procédures, ce qui peut nuire à l'optimisation économique et à la recherche de variantes.

*d)* Dissuasion de solutions innovatrices plus économiques dont l'approbation est souvent plus difficile.

D'où les suggestions suivantes :

— Éviter d'imposer des contraintes qui ne soient pas réellement indispensables. Laisser le maximum de souplesse dans le choix des solutions.

— Donner la possibilité d'approuver initialement un projet de base relativement détaillé, mais aussi, sous certaines conditions, une ou plusieurs solutions variantes. Prévoir la possibilité d'une procédure complémentaire plus rapide pour l'approbation d'une solution variante étudiée ultérieurement.

## 5.3. ÉTUDES

Les études, notamment initiales, sont parfois effectuées par le maître d'ouvrage et certaines études de détail sont parfois réalisées par l'entrepreneur, mais une grande partie ou la totalité des études sont souvent confiées à un bureau d'ingénieurs conseils, sélectionné généralement sur des critères liés à la sécurité (compétence et expérience d'études similaires), au financement ou au coût des études qui ne représente qu'une faible partie du coût des ouvrages, notamment s'il n'inclut pas les études d'exécution.

Si la supervision n'est pas assurée par les responsables de la conception du projet, *il est essentiel* pour la sécurité de prévoir en cours de travaux des visites périodiques du concepteur pour vérifier l'adaptation aux conditions réelles.

- 1) Involvement of outside bodies.
- 2) Design process and selection.
- 3) Award of construction contracts.
- 4) Construction and works supervision.

## 5.2. OUTSIDE BODIES

Outside bodies with a *de jure* or *de facto* right of decision or veto defend legitimate interests. Without wishing to restrict their efforts or question their competence or general desire for efficiency, it is useful to remember some of the problems that can arise from their simultaneous or sequential interventions :

*a)* The procedures may be very slow and it is essential for cost that they do not create delays during construction.

*b)* The actual cost from the extra restrictions, requirements or specifications they impose may be greater than originally envisaged, partly because it may be difficult to amend them to suit actual conditions on site.

*c)* The main outlines of the design have to be finalised quite early for submittal and this may hamper economic optimisation and examination of alternatives.

*d)* There is a disincentive to formulate more economical innovative designs, for which approval is often more difficult to obtain.

These points give rise to the following suggestions :

— Do not impose requirements that are not really essential. Leave as much flexibility as possible in the choice of designs.

— Allow them to give approval to a relatively detailed basic design as well as one or more alternatives under some conditions. Provide the possibility of a quicker supplementary procedure for approving a late alternative.

## 5.3. DESIGN

Design, especially the preliminary studies, is sometimes done by the executive agency with some detail design left to the contractor, but often all or most is awarded to a consulting engineering firm selected from considerations associated with safety (i.e. its competence and experience with similar projects), financing and cost of the design work, which represents only a small fraction of the project cost, especially when it does not include detail design.

If the designers are not responsible for works supervision, *it is essential* for them to make periodical visits to the site to ensure that modifications to the design to suit actual conditions do not jeopardise safety.

### 5.3.1. Avantages d'une plus grande compétition dans la sélection des projets

Il paraît essentiel de souligner que les clauses de nombreux contrats d'études, relatives notamment aux responsabilités et à la rémunération du projeteur (fixée souvent à la suite d'une dure compétition), peuvent inciter celui-ci, quels que soient sa compétence, sa conscience professionnelle et son goût du progrès technique, à concentrer ses efforts sur un seul projet, de caractère souvent traditionnel, donc moins coûteux à étudier et moins susceptible de critiques mais dont le coût de construction peut être très au-dessus de l'optimum. Comme par ailleurs le coût comparé de différents projets est difficile à établir à ce stade, le type d'ouvrage choisi dans bien des cas résulte plus d'une tradition que de l'adaptation optimale aux conditions physiques ou économiques du site. L'évolution dans les autres domaines de la construction résulte d'une vive compétition à tous les stades; si cette compétition existe souvent pour le choix des ingénieurs conseils ou des entrepreneurs de barrages, elle n'existe que rarement en réalité pour le choix des projets, ce qui constitue une entrave fondamentale à l'optimisation des coûts et *peut expliquer l'évolution lente de la technique des barrages.*

### 5.3.2. Orientations vers une optimisation réelle du projet

S'il est maintenant reconnu, à la suite d'expériences malheureuses, qu'un investissement correct en reconnaissances et sondages est une grande source d'économies, l'investissement initial en études est souvent trop faible pour conduire au projet optimal.

Il n'existe pas de solution miracle à ce problème, mais on peut cependant, en s'inspirant parfois de ce qui se passe pour d'autres techniques de construction, proposer des orientations ou des solutions pratiques permettant d'apporter au Projeteur la flexibilité et l'incitation souhaitables.

a) Si le Maître d'Ouvrage fait lui-même un avant-projet, il peut confier à un Ingénieur Conseil la recherche d'une variante.

b) De grands bureaux d'études ont une bonne expérience de types d'ouvrages très variés, certains ont une expérience plus restreinte; plusieurs avant-projets détaillés peuvent donc être demandés à un même Ingénieur Conseil ou à des Ingénieurs Conseils différents.

c) Pour les ouvrages importants ou difficiles, le Maître d'Ouvrage a parfois recours à un « comité » d'experts indépendants. Si ceux-ci sont choisis suffisamment tôt, ils peuvent intervenir de manière très positive sur le choix des projets, en suggérant des solutions variantes ou des améliorations de solutions proposées par l'Ingénieur Conseil et en cautionnant ou critiquant des solutions innovatrices.

d) En cours d'études, le conseil d'Entrepreneurs sur les méthodes ou le programme d'exécution peut être utile.

e) Lorsqu'un site ne pose pas de problème technique exceptionnel, notamment en matière de fondation, des solutions variantes peuvent être proposées par les Entrepreneurs.

Cette possibilité peut amener des solutions économiques et innovatrices sans affecter la sécurité si le projet variante est étudié avec le concours d'un Ingénieur Conseil expérimenté et soumis naturellement au contrôle du Maître d'Ouvrage.

### 5.3.1. Advantages of greater competition in project selection

It is important to recognise that many design contract clauses on the designer's responsibilities and remuneration (often calculated after fierce competition) may incite the firm, regardless of its competence, sense of responsibility and taste for promoting technical progress, to concentrate its efforts as early as possible on a single design, more often than not conventional in character, and thus less expensive to design and less liable to criticism, even though its construction cost may be well above the optimum. And in any case, since comparative costs of alternatives are difficult to establish at this preliminary stage, it is not surprising that designs often selected are more the result of tradition than an effort to tailor them to the physical and economic characteristics of the site. In other construction areas, advances are the outcome of lively competition at every stage of the process; although such competition does exist in dam engineering for selecting consulting engineers and contractors, it is rare in selecting optimum designs. This is a key obstacle to cost optimisation and *may explain why progress is slow in dam engineering.*

### 5.3.2. Guidelines towards a truly optimised design

Unhappy experience in the past has now made it universally recognised that a proper investment in site investigation and drilling produces savings, but investment in the design work is often too small to arrive at a truly optimum project.

There is no ready-made solution to this problem but we can look at what is done in other engineering fields to suggest some general guidelines or practical hints to give designers the desirable flexibility and incentives.

*a)* If the owner prepares its own preliminary design, it might commission a consulting engineer to find an alternative.

*b)* Large consulting firms may be familiar with a wide variety of dams, whereas others may be more specialised. Alternative preliminary designs might thus be sought from a single firm or a number of different consultants.

*c)* For large or difficult projects, the owner might form a panel of independent experts. If they are appointed early enough, they can have a very positive influence on the choice of designs by suggesting alternative solutions and improvements to the consultants' designs, and by sanctioning or criticizing innovative proposals.

*d)* During the design process, advice from contractors on methods and programme may be useful.

*e)* Contractors may suggest alternatives if the site is free from exceptional foundation or other problems.

This may generate innovative, economical solutions without affecting safety if the alternative is studied with assistance from an experienced consultant and naturally subject to checking by the Owner.

*f)* Parfois la compétition peut porter sur des barrages clefs en main (études et travaux), les reconnaissances générales étant réalisées au préalable. Il est préférable d'éviter cette solution si les conditions de fondation sont très difficiles.

Dans tous les cas ci-dessus, les variantes proposées peuvent porter sur le type de barrage ou sur diverses dispositions (implantation, évacuateur de crue, dérivations provisoires et batardeaux, traitement des fondations...), sur le choix des emprunts ou carrières.

Plusieurs reproches peuvent être faits à cette concurrence entre variantes au stade du projet ou de l'avant-projet.

*a)* Il est plus difficile de fixer les responsabilités, mais ce problème peut être bien résolu s'il est abordé et clarifié suffisamment tôt.

*b)* Cette compétition peut choquer certaines habitudes, mais elle paraît en fait de nature à développer encore la qualité des projets de barrages, et la confrontation de diverses solutions peut améliorer l'analyse des risques correspondants et en fait la sécurité. Le développement de telles solutions pour les grands ponts a permis de nombreux progrès techniques et économiques, sans nuire à leur sécurité.

*c)* Le coût d'études peut être un peu plus élevé : le surcoût ne doit pas être surestimé car les plus fortes dépenses d'études sont souvent les reconnaissances générales (hydrologie, géologie, accès, emprunt, environnement) communes en grande partie à la plupart des avant-projets, et les études de détail qui peuvent être en partie postérieures au choix. Le coût des avant-projets eux-mêmes est relativement réduit pour un Ingénieur Conseil compétent, compte tenu de sa documentation et des moyens modernes de calculs et de métrés. Le surcoût d'études correspondant à ces suggestions paraît devoir être de l'ordre de 0,5 à 1 % du coût des ouvrages, donc très inférieur à l'économie qu'on peut attendre de la réalisation d'une solution moins chère, ou même de l'économie résultant sur chacun des projets de l'existence d'une compétition. Il peut cependant arriver que les diverses solutions correspondent à des implantations différentes et conduisent ainsi à des reconnaissances géologiques plus importantes, indispensables pour la fiabilité des comparaisons et pour éviter de graves difficultés à l'exécution. Ce surcoût peut être parfois plus important que le surcoût d'études.

Vu la difficulté de chiffrer précisément le coût réel des différents projets, la meilleure méthode de comparaison est une compétition des Entrepreneurs sur 2 ou 3 projets ainsi étudiés et non sur un seul comme c'est le cas habituel. En plus de l'économie immédiate qu'elles procurent, de telles comparaisons précises peuvent faciliter l'orientation des études initiales de futurs projets et permettre ainsi d'autres économies substantielles.

Pour éviter de mener aussi loin l'étude comparée de plusieurs solutions, les Maîtres d'Ouvrages demandent parfois des estimations sommaires à un ou plusieurs Entrepreneurs à un stade préliminaire. Cette estimation ne peut avoir de signification qu'à titre comparatif et risque d'être peu valable en valeur absolue car l'Entrepreneur consulté peut n'être pas le moins-disant futur et ne précise d'ailleurs pas nécessairement son niveau de prix minimal longtemps avant l'appel d'offres réel: elle n'a une certaine fiabilité que si elle est basée sur une étude comparative analytique assez détaillée adaptée au site; elle peut coûter de l'ordre de un pour mille du coût des travaux mais ses détails peuvent être utiles au Maître d'Ouvrage pour éclairer son choix. Cette solution peut être surtout utilisée efficacement lorsque l'exécutant n'est pas choisi par appel d'offres et peut participer aux stades initiaux de l'étude.

*f)* Competing alternatives may be encouraged by turnkey contracts for design and construction, the preliminary site investigations being conducted beforehand. This type of contract should be avoided if there are very difficult foundation problems.

In all the above cases, the suggested alternatives may concern dam type, but also siting, spillway, diversions and cofferdams, foundation treatment, etc., choice of borrow pits or quarries, etc.

Various criticisms can be made of this type of competition at the design or project planning stages :

*a)* It is more difficult to attribute the responsibilities but this can be satisfactorily overcome if it is dealt with and clarified early enough.

*b)* Such competition may outrage some habits, but it does seem susceptible to further improve dam design quality and comparing various alternatives may make it easier to perform the relevant risk analyses and so improve safety. Greater use of such approaches for large bridges has enabled much progress to be made in technique and cost without harming safety.

*c)* Design costs may be slightly higher. The extra cost must not be over-estimated because the greatest cost items are often the general investigations (hydrology, geology, access, borrows, environment) that are for the most part shared by all the preliminary designs, and some of the detailed studies can be performed after the choice is made. The cost of the preliminary designs proper is relatively small for a competent consulting engineer, considering the records and modern analytical and survey methods available to him. The extra design cost arising from these suggestions should therefore be of the order of 0.5-1 % of the cost of the structures, i.e. much less than the saving that can be expected from a less expensive design, or even than the saving in all the alternatives generated by the competition. It may happen that the alternatives are for different positions of the dam at the site, thus leading to more site investigations needed for proper comparison and avoiding serious constructional problems. The extra cost involved may in this case be greater than the extra design cost.

In view of the difficulty of accurately quantifying the real cost of the alternative designs, the best method of comparison may be competitive tendering for two or three designs, not a single one as is usually the case. In addition to the immediate savings they generate, such accurate comparisons can also help to guide the initial studies for future projects and make possible other substantial savings.

In order to avoid carrying the comparison of several alternatives so far, the owners sometimes seek summary estimates from one or more contractors at an early stage. The estimate can only be meaningful for the purposes of comparison and may be unreliable in absolute terms, since the contractor consulted may not be the one eventually putting in the lowest tender and may not necessarily give his minimum price levels so long before the actual time of tendering. It will only be reliable to any extent if it is based on a quite detailed comparative analysis of the site. It may cost something of the order of one per thousand of the construction cost but its details may be useful in guiding the owner's choice. The approach can be used effectively when the contractor is not chosen by tender and may take part in the initial phases of design.

## 5.4. TRAVAUX

Les travaux sont le plus souvent réalisés par un organisme spécialisé (appelé généralement l'Entrepreneur) qui peut être également dans certains cas responsable d'une partie des études (études de détail ou de certaines parties d'ouvrages provisoires ou définitifs).

### 5.4.1. Avantages et inconvénients de l'adjudication

L'attribution des travaux se fait très souvent par appel d'offres entre entreprises, l'adjudication se faisant généralement à l'offre la plus attractive financièrement. Le jugement des offres et le règlement des travaux se font très souvent sur la base d'un détail estimatif. Cette compétition présente l'avantage essentiel de faire bénéficier le Maître d'Ouvrage des efforts d'imagination et d'organisation des différents Entrepreneurs, de leurs disponibilités en matériel, des sources les plus économiques de personnel et de matériaux, et cette solution conduit le plus souvent à des coûts nettement plus faibles (surtout à l'origine des travaux, l'économie finale étant parfois plus réduite qu'espéré). Cette solution, qui est d'ailleurs légale dans beaucoup de pays, présente cependant l'inconvénient d'ajouter, après l'achèvement du ou des avant-projets, un temps assez long pour l'étude par les entreprises et le jugement des offres, mais ce temps est souvent utilisé pour des travaux préparatoires. Certains pays réduisent la durée de jugement des offres en se basant uniquement sur le critère de prix, solution qui présente souvent plus d'avantages que d'inconvénients.

En cas d'appels d'offres restreints avec préqualifications, de nombreuses controverses portent sur le nombre souhaitable d'entreprises admises à soumissionner. Un nombre trop faible réduit la compétition, un nombre trop élevé dissuade certaines entreprises très valables d'entreprendre une étude coûteuse et la compétition réelle n'est pas forcément améliorée. La recherche d'un prix trop bas n'est pas d'ailleurs nécessairement l'intérêt du Maître d'Ouvrage; si une compétition très vive ou des négociations serrées après soumission conduisent à un prix inférieur au coût réellement prévisible des travaux, il est probable que l'Entrepreneur, *dont la vocation et l'intention ne sont pas de subventionner le Maître d'Ouvrage*, consacrera une grande part de ses efforts à chercher à augmenter son prix ou à réduire son coût, parfois au détriment de la qualité. Le plus souvent le nombre de soumissions reste compris entre 5 et 10 suivant l'importance et la technicité de l'affaire, ce qui paraît raisonnable.

### 5.4.2. Autres méthodes parfois utilisées

Mais il arrive parfois, notamment pour gagner du temps sur le délai ou le coût d'études ou pour un ouvrage à aléas importants, ou suivant les habitudes de certains pays, que les travaux soient confiés à un Entrepreneur avant l'achèvement de l'avant-projet et payés en fonction des coûts réels. Cette solution permet d'associer l'exécutant à la mise au point du projet, de raccourcir le délai global, d'éviter de nombreux litiges, mais elle n'est pas aussi incitatrice pour l'Entrepreneur que la compétition et le paiement par détail estimatif. Une participation substantielle de l'entreprise à la différence entre le coût réel et un coût global d'objectif fixé en cours d'études peut cependant conduire parfois à un coût assez proche de l'optimum. Le choix de l'Entrepreneur peut être par ailleurs sujet à controverses.

## 5.4. CONSTRUCTION

Construction is usually done by a specialised organization (usually termed “the contractor”) which may in some cases also be responsible for part of the design work (detail design or design of certain parts of the temporary or permanent works).

### 5.4.1. Advantages and drawbacks of tendering procedure

Construction is very often awarded by competitive tendering, the award usually going to the most financially attractive tenderer. Contract award and payments are usually based on a quantity estimate. Such competition has the chief advantage of enabling the owner to benefit from the imagination and organisational efforts of several contractors, their plant availability, the most economical supplies of labour and materials. It commonly produces distinctly lower costs (especially at the beginning of construction, the ultimate saving sometimes being less than expected). This approach which is in fact required by law in many countries does however have the disadvantage of adding, after completion of the preliminary design(s), quite a long period of time for the tendering and award, although it is often used for performing the preliminary works. Some countries shorten the time needed for examining tenders by considering only the cost criterion, an approach which often has more advantages than disadvantages.

With restricted tendering from prequalified contractors, there is much controversy as to the best number to be invited to tender. Too few reduces competitiveness; too many may discourage some very competent contractors from undertaking a costly study, and competition is not really improved. Seeking too low a price is not necessarily in the owner’s interest, and if lively competition and hard bargaining after submittal lead to a lower price than the true cost of the works, then the contractor, *who is not concerned with subsidising the owner*, will spend much of his effort on trying to increase his prices or keep down his costs, sometimes to the detriment of quality. Most often, the number of tenders is between five and ten depending on size and difficulty to the job, which seems reasonable.

### 5.4.2. Other procedures sometimes feasible

Construction may be awarded before completion of preliminary design and paid on the basis of actual cost, in order to save design time and money, or with projects having substantial contingency factors, or because it is the usual practice in some countries. This approach enables the contractor to take part in the finalisation of the design, and it shortens the overall project time and avoids many disputes, but it does not provide as much incentive for the contractor as competitive tendering and payment against a quantity estimate. Substantial sharing by the contractor in the difference between actual cost and a target cost set in the course of design may however sometimes lead to a cost that is quite near the optimum. But the choice of contractor may be the subject of controversy.

Enfin, certains appels d'offres, basés sur le principe du détail estimatif, utilisent partiellement les avantages des autres systèmes, par exemple en réglant au coût réel certaines parties des travaux difficiles à chiffrer (nettoyage des fouilles...), en traitant à forfait certains éléments dont l'étude est confiée à l'Entrepreneur (accès, dérives provisoires, batardeaux...), en acceptant des variantes pour certains postes dépendant beaucoup de moyens d'exécution très évolutifs, par exemple pour le traitement des fondations (injection, drainage, consolidation...).

La recherche d'économie peut conduire également le Maître d'Ouvrage à accepter des solutions variantes proposées par l'entreprise. Cette possibilité, rarement encouragée à vrai dire par les Ingénieurs Conseils, peut être acceptable si les conditions de fondation ou la nature des remblais ne posent pas de problèmes très difficiles.

La complexité des procédures et des relations conduit exceptionnellement le Maître d'Ouvrage, après reconnaissance générale, à rechercher un contrat clés en mains (études et travaux) qui peut être totalement ou partiellement forfaitaire (ajustement partiel en fonction des conditions réelles de fondation...).

Cette dernière procédure a permis de grands progrès dans d'autres types d'ouvrages (ponts, immeubles, travaux maritimes, etc.). *Son développement aurait probablement une influence considérable sur l'évolution technique et économique des barrages.*

#### **5.4.3. Exécution et supervision des travaux**

Les responsables de l'exécution et de la supervision des travaux de barrages doivent souvent résoudre des problèmes techniques imprévus, chercher à éviter les surcoûts et les retards correspondants. Les fondations et les matériaux constitutifs des ouvrages (surtout pour les barrages en remblai) correspondent rarement exactement à ce qui était prévu, le climat et la rivière peuvent influencer sur le programme, et le succès de la réalisation dépend des décisions à prendre fréquemment et rapidement par l'Organisme de Coordination et Supervision (ci-dessous appelé la Supervision) ou l'Exécutant (ci-dessous appelé l'Entrepreneur). Comme l'indique justement le rapport du Comité des États-Unis (Annexe C) « la construction des barrages n'est pas une science exacte et sa supervision nécessite de nombreux jugements quotidiens qui ne peuvent être exercés que par des hommes d'expérience. Il est impossible de prévoir l'infinité de situations qui peuvent se présenter dans la construction de barrages et de définir une procédure pour chacune ». Le succès nécessite non seulement des intervenants compétents mais encore un esprit de coopération permettant de surmonter en commun les problèmes imprévus et de trouver une solution équitable aux litiges qui peuvent apparaître sur le règlement des travaux et l'application des spécifications. Il paraît donc utile de rappeler les caractéristiques et les motivations des intervenants, de chercher à identifier les erreurs à éviter et les améliorations pratiques à apporter.

Le but d'un Entrepreneur est de gagner de l'argent, en réalisant un travail correct dans le délai prévu, et en conservant ou améliorant sa réputation. Ses représentants sont généralement choisis pour leurs qualités techniques et leur efficacité : l'Entrepreneur leur laisse en général beaucoup d'initiatives, leur apporte l'appui nécessaire et les remplace s'il estime que l'efficacité souhaitable n'est pas atteinte de leur fait. Mais, dans la plupart des pays, un Entrepreneur réalise un profit moyen de l'ordre de un à deux pour cent de son chiffre d'affaires global; il peut difficilement

Lastly, tendering procedures based on a quantity estimate may partially make use of the advantages of other systems, e.g. by paying some parts of the job that are difficult to estimate on actual cost (scaling down foundation excavations, etc.), agreed lump sums for parts designed by the contractor (access, river diversion, cofferdams, etc.) and accepting alternatives for certain items that are greatly dependent on highly changeable plant, e.g. foundation treatment (grouting, drainage, consolidation, etc.).

The search of economy may also incite the owner to accept alternatives put forward by the contractor. This possibility, which in fact is not encouraged by consulting engineers, may be acceptable if foundations and fills do not involve very difficult problems.

The complexity of procedures and relationships may in some cases incite the owner, subsequent to the general investigations, to seek a turnkey contract for design and construction together, which may be paid on a lump sum basis in whole or part (say, with partial adjustment to suit actual foundation conditions, etc.).

This has enabled great progress to be made in other types of engineering (bridges, buildings, coastal works), *Its development would probably have a considerable influence on technical and economic progress in dam engineering.*

#### **5.4.3. Construction and works supervision**

Those in charge of dam construction and works supervision often have to solve unexpected technical problems while trying to avoid extra cost and delays. Foundations and the constituent materials of dams (especially embankment dams) are rarely as expected, the climate and river can affect the construction programme and the success of the operation depends on decisions that must be taken frequently and rapidly by the coordination and supervision organisation (hereafter called the supervisor) or builder (hereafter called the contractor). As rightly stated in the report from the United States Committee (Appendix C), " Dam construction is not an exact science and inspection involves many judgements on a daily basis which can be made only by experienced, well-trained individuals. It is impossible to anticipate the infinite number of situations which can arise in dam construction and devise a procedure for each one ". As well as competence, success calls for a spirit of cooperation to find joint remedies to unexpected problems and fair and equitable solutions to disputes that may arise in connection with payment of the works and the application of the specifications. It is useful to review the characteristics and motivations of the parties involved, to try to identify the mistakes that must be avoided and practical improvements to be made.

The objective of the contractor is to make money by doing a fair job in the agreed time while maintaining or improving his reputation. His representatives are usually chosen for their technical knowledge and their efficiency. The contractor usually leaves them considerable freedom, provides the necessary back-up and replaces them if he considers that the desired efficiency is not being achieved because of them. But in most countries, a contractor makes an average profit of the order of one or two per cent of his overall turnover. He can hardly accept losing ten

accepter de perdre dix ou vingt pour cent du montant d'un contrat, surtout si cette perte est due à une application inutilement stricte des spécifications, à des conditions d'exécution imprévisibles, à des retards dont il n'est pas responsable. S'il est possible de résoudre équitablement la plupart des problèmes en cours de chantier, on évite non seulement des arbitrages longs et coûteux pour tous, mais une atmosphère de contentieux qui nuit au bon déroulement du chantier.

Le rôle de la Supervision et de ses représentants est aussi important pour le succès de la construction que celui de l'Entrepreneur. Il s'exerce dans trois domaines : la gestion (problèmes administratifs et techniques, transmission et approbation des plans, coordination entre Entrepreneurs, choix et approbations diverses, adaptations aux imprévus), l'application des spécifications, le paiement des travaux.

La gestion demande beaucoup de qualités, notamment pour éviter les retards et les surcoûts inutiles, et bien des litiges importants survenant à l'exécution peuvent ainsi être évités par une bonne supervision.

L'application des spécifications est une question de bon sens et de mesure, une application trop stricte pouvant ruiner l'Entrepreneur et retarder gravement et inutilement les travaux. Suivant une citation du rapport du Comité des États-Unis (Annexe C) « une adhésion rigide aux spécifications et aux procédures, sans appel au jugement, risque d'augmenter les coûts de construction dans notre industrie au point d'empêcher la réalisation de nombreux projets ».

Les décisions sur le paiement des travaux peuvent entraîner de nombreux litiges; réduire injustement les paiements et surtout les retarder inutilement entraîne non seulement des réclamations mais de mauvaises relations préjudiciables pour tous; écouter par contre toutes les demandes d'un Entrepreneur imaginatif peut conduire à des surcoûts importants et injustifiés.

Ainsi l'objectif d'une bonne supervision doit être double :

a) Éviter des surcoûts et des délais inutiles par une bonne gestion et *des décisions rapides*, et par une application raisonnable des spécifications.

b) Payer équitablement et rapidement les travaux prévus et les surcoûts imprévus non inclus dans les prix.

Lorsque les intervenants sont efficaces et que leurs relations sont bonnes, les difficultés rencontrées, même très importantes, sont en général résolues vite et bien.

Par contre, les surcoûts inutiles, supportés en grande partie par l'Entrepreneur, *sont également une charge pour le Maître d'Ouvrage*, soit directement par paiement de réclamations, soit par surcoût des ouvrages ultérieurs, car le niveau des prix de soumission peut varier suivant la réputation des maîtres d'ouvrages ou des organismes de supervision.

#### **5.4.4. Contrats de supervision**

Si les modifications de projet ou de spécifications dépendent de l'Ingénieur Conseil, la Supervision doit avoir des pouvoirs importants de décision et ses responsabilités doivent être clairement établies. Si le Maître d'Ouvrage exerce lui-même la supervision (avec parfois un conseil extérieur), il doit laisser à ses représentants l'initiative nécessaire pour des décisions rapides pouvant entraîner des engagements financiers. Supprimer toute possibilité dans ce domaine conduit nécessairement à des blocages, des retards et finalement des surcoûts importants dont une grande part sera payée tôt ou tard par le Maître d'Ouvrage.

or twenty per cent of a contract price if the loss is due to needlessly stringent application of the specifications, unpredictable working conditions or delays beyond his control. If most problems during construction can be solved fairly, this not only avoids arbitrations that are time-consuming and costly for all involved, but also the bad feeling which can impede the proper progress of the work.

The role of the supervisor and his representatives is as important for success as the contractor's. It covers three areas : management (administrative and technical problems, transmission and approval of drawings, contractor's coordination, sundry decisions and approvals, modifications for unexpected factors), application of the specifications and payment.

Management demands many qualities, especially to avoid needless delays and extra costs, and many serious disputes arising during construction can be avoided by proper supervision.

Adherence to specifications is a matter of common sense and perspective; overstringency can ruin the contractor and seriously and needlessly delay the works. As stated in the United States Committee's report (Appendix C), " Rigid adherence to the specifications or procedures without application of the judgement factor will soon increase construction costs in our industry to the point where many projects will be priced out of the market ".

Payment decisions can lead to many disputes. Unjustly reducing payments or, more importantly, delaying them needlessly not only leads to disputes, it results in a bad relationship which harms all concerned. On the other hand, listening to all the claims from an imaginative contractor can lead to large and unjustified extra cost.

A good supervisor therefore has two aims :

a) Avoid needless extra time and cost through good management and *quick decisions* and through reasonable adherence to the specifications.

b) Pay fairly and quickly for contracted work and unpredicted extra costs not included for in the rates and prices.

When the contractor and supervisor are efficient and their relationship is good, even major difficulties that may arise are usually solved quickly and successfully.

On the other hand, needless extra cost, often met largely by the contractor, *is also a burden on the owner*, either directly because he pays claims or by pushing up the cost of future projects, since tender prices may vary with the reputation of the owner or supervisor.

#### **5.4.4. Supervision contracts**

Although changes in designs or specifications should generally remain the responsibility of the designer (engineer), the supervisor must be given wide powers of decision and responsibilities must be clearly laid down. If the owner does its own supervision (sometimes with outside help), it must leave its representatives enough freedom to make quick decisions, including those involving a financial commitment. If this is rendered entirely impossible, there will inevitably be bottlenecks, delays and in the end large extra costs, much of which will be paid sooner or later by the owner.

Lorsque celui-ci confie la supervision à un organisme indépendant ou à l'Ingénieur Conseil chargé des études, il doit aussi déléguer des pouvoirs réels, y compris dans l'engagement des dépenses et le paiement des imprévus. Si les contrats d'entreprise (notamment du modèle FIDIC) prévoient que la Supervision (l'Ingénieur) a un réel pouvoir de décision et une relative indépendance, ceci doit correspondre à la réalité et ne pas être contredit par le texte du contrat entre Maître d'Ouvrage et Supervision ou par son application; sinon on peut s'attendre à un contentieux permanent sur le chantier, à des retards et à des arbitrages longs et coûteux.

Une bonne supervision dépend plus de la qualité que de la quantité de ses représentants. Certains contrats de supervision fixent le nombre et le temps de présence des divers représentants de la supervision et sont attribués aux offres correspondant aux tarifs les plus faibles : cette solution conduit rarement à une supervision efficace et au coût minimal global des travaux. Le contrôle de qualité comporte trop souvent d'inutiles contrôles de détail, coûteux pour l'Entrepreneur, mais faciles à exercer par des contrôleurs peu compétents.

Les retards dans la réalisation des travaux peuvent être dus à l'Entrepreneur ou à des conditions extérieures (terrain, crues, etc.), mais aussi à la Supervision (décisions ou approbations tardives, mauvaises transmissions de plans, application trop stricte de spécifications...). Les surcoûts correspondants qui peuvent être très importants sont généralement supportés en grande partie par l'Entrepreneur (surcoûts directs, frais généraux, pénalités...) et par le Maître d'Ouvrage (perte de production, frais financiers, réclamations de l'entreprise).

La Supervision qui peut avoir une responsabilité importante dans ces retards participe très rarement aux surcoûts correspondants et son temps de présence supplémentaire sur le chantier lui est souvent remboursé, parfois avec profit, quelle que soit en fait la cause réelle du retard. Il semble qu'une participation réelle de la Supervision aux surcoûts dus à tous les retards créerait une incitation complémentaire profitable à tous, et dans bien des cas faciliterait sans inconvénient la tenue des délais, mais cette participation devrait être limitée à un faible pourcentage du contrat de supervision. Une prime pourrait également être prévue si le délai d'exécution est respecté.

Nous concluons en citant la phrase finale du rapport du Comité des États-Unis (Annexe C) : « Sur chaque chantier, le comportement à rechercher pour la Supervision et l'Entreprise est le travail en équipe pour fournir au Maître d'Ouvrage un résultat satisfaisant sans pénaliser les finances de l'Entreprise. »

De nombreux Maîtres d'Ouvrages expérimentés qui savent bien choisir leurs Ingénieurs Conseils, leurs Entrepreneurs et leur Supervision et fixer les responsabilités ont démontré que cet objectif pouvait et devait être atteint pour le bénéfice de tous.

When the owner lets out the supervision to an independent body or to the consulting engineer responsible for the design, it must also delegate real powers, including the power to make cost decisions and pay for unexpected events. When the contractor's contract (on the FIDIC model) presents the supervisor (the engineer) as relatively independent with real powers of decision, this must be put into effect and not contradicted by the contract between the owner and the supervisor or the way it is interpreted; otherwise permanent disputes can be expected on site, with delays and time-consuming, costly arbitration.

Proper supervision depends more on the quality than the quantity of representatives. Some supervision contracts state the number of supervision representatives and the time they must be present on site and are awarded to tenders with the lowest rates. This rarely produces the most efficient supervision or the lowest overall construction cost. Approval procedures include often useless detailed checks that are costly for the contractor but convenient for incompetent supervisors.

Delays in construction may be due to the contractor or external factors (ground conditions, river floods, etc.) but may also be caused by the supervisor through slow decisions or approvals or transmission of drawings, overstringent adherence to the specifications, etc. This may lead to considerable extra cost, usually met largely by the contractor (direct extra costs, on-costs, penalty payments, etc.) and the owner (loss of production, interest on loans, contractor's claims, etc.).

The supervisor who may be largely responsible for such delays rarely pays any of the extra cost and the extra time he spends on site is frequently refunded, sometimes with a profit margin, regardless of the true cause of the delay. It would appear that some real contribution, even small, to the extra cost by the supervisor for all delays, would be an extra incentive that would benefit everybody and often help in meeting completion dates without inconvenience. This penalty should be limited to a small percentage of the supervision contract, and could be balanced by a premium for on-time completion.

We shall conclude by quoting the final sentence in the United States (Appendix C) report :

“ On every job, the attitude needs to be developed that the Inspector and Contractor are a team working to produce a satisfactory product for the Owner without penalization to the Contractor. ”

Many experienced Owners who know how to choose the Consultants, the Contractors and Supervisors and properly apportion responsibility have demonstrated that this objective can and must be achieved for the benefit of all concerned.

---

## 6. ADAPTATION DE LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN FONCTION DES COÛTS

---

### 6.1. DISPOSITIONS GÉNÉRALES

La disposition générale des ouvrages (position du barrage, de l'évacuateur de crue, des dérivations, prises d'eau, etc.) est fixée par le Projeteur en fonction de l'hydrologie, de la géologie et de la topographie de la vallée en recherchant une solution sûre pour le moindre coût; mais cette recherche est souvent orientée en fait vers la recherche du *barrage de volume minimal, qui peut être souvent très différent de l'ouvrage de coût minimal*. En effet, pour un barrage en remblai, les coûts unitaires peuvent varier beaucoup en fonction de la disposition générale des ouvrages et le montant global des dépenses (évacuateur de crue, ouvrages provisoires de dérivation, traitement de la fondation et fouilles) ne varie pas nécessairement dans le même sens que le volume du barrage. C'est également souvent vrai pour les barrages en béton, où le coût du ciment, qui seul est sensiblement proportionnel au volume de l'ouvrage, ne représente qu'environ dix pour cent du coût total.

Les éléments résultant de l'implantation et de la disposition des ouvrages, qui influent le plus sur les coûts unitaires sont :

- a) Les facilités d'accès au site et à l'intérieur du site et les facilités d'installation.
- b) La régularité d'emploi des moyens en personnel et matériel, beaucoup de dépenses étant liées à la cadence maximale de travaux ou à la durée de présence des moyens sur le chantier. Cette régularité peut dépendre beaucoup du climat et des variations de débit de la rivière.

Une étude réaliste des programmes et des cadences est essentielle pour la comparaison des différentes solutions. Ces programmes doivent prendre des marges importantes si le non-respect de délais partiels entraîne des risques ou des retards graves.

Ces éléments sont généralement pris en compte dans une certaine mesure par des projeteurs expérimentés mais ce n'est pas toujours le cas, et on omet souvent d'étudier des solutions où les quantités sont nettement plus élevées, mais l'exécution beaucoup plus facile et plus sûre et le prix final inférieur, faute d'avoir les éléments de variation des prix unitaires suivant les solutions.

Il y a cependant et fort justement une tendance dans beaucoup de cas :

a) A ne pas choisir systématiquement dans les vallées étroites l'emplacement le plus resserré ou les pentes les plus raides, où les difficultés d'implantation des ouvrages hydrauliques, les coûts unitaires élevés et les délais plus longs peuvent compenser largement les réductions de quantité.

b) A chercher à implanter les ouvrages les plus complexes (usines hydroélectriques, évacuateurs de crue, ...) en dehors du lit mineur de la rivière.

---

## 6. DESIGN CHANGES WITH REFERENCE TO COST

---

### 6.1. GENERAL ARRANGEMENT OF WORKS TO AID CONSTRUCTION

The general arrangement of the works (position of dam, spillway, diversions, intakes, etc.) is decided by the designer on the basis of the site hydrology, geology and valley geometry to find the safest arrangement at least cost. But this in fact often means finding *the minimum volume for the dam, which often may be far from the minimum cost*. With an embankment structure, unit costs can vary greatly with the general arrangement of the works and the total outlay (spillway, temporary diversion works, foundation treatment and excavations) does not necessarily vary in the same way as the dam volume. This is also often true for concrete dams where the cost of the cement, which is the sole item roughly proportional to dam volume, may only represent about ten per cent of the total cost.

The items associated with the layout and general arrangement of the works which have the greatest effect on unit costs are :

- a) Ease of access to and around the site and ease of installation.
- b) Regularity of use of plant and labour, much of the expense being associated with peak work rates and the total time plant and labour spends on site. This problem is essentially bound up with river and weather conditions.

A realistic study of construction times and rates of progress is essential for comparing alternatives. The programme must include ample margins if failure to meet partial completion times involves serious risks or delays.

These factors are usually taken into account to some extent by experienced designers but this is not always so; and there is a tendency to omit alternatives whose quantities are distinctly greater but whose construction is easier and safer and the ultimate cost minimised, often for lack of information for assessing unit prices of different alternatives.

However, there is already an entirely justifiable tendency in many cases :

- a) To avoid systematically choosing the narrowest point with the steepest banks in narrow valleys where difficulties in fitting the hydraulic components, high unit costs and longer construction time more than offset reduction in quantities.
- b) To try to site the more complex works (hydro-electric powerstation, spillways, etc.) outside the main river channel.

c) Pour les ouvrages de hauteur faible ou moyenne situés sur les rivières à fort débit, à rechercher des zones où la vallée est assez large pour implanter pratiquement tous les ouvrages complexes en dehors de la rivière.

## 6.2. MAÎTRISE DE LA RIVIÈRE PENDANT LES TRAVAUX

Les choix techniques pour la maîtrise de la rivière influent sur le coût des ouvrages correspondants, mais souvent aussi sur le coût des ouvrages principaux; ils dépendent beaucoup des problèmes d'exécution. On peut profiter de l'expérience correspondante des entrepreneurs, soit en utilisant leurs conseils, soit en leur laissant la responsabilité totale ou partielle de la conception des ouvrages provisoires correspondants, dans le cadre de certaines règles concernant la sécurité des ouvrages définitifs et des populations aval. Enfin, diverses solutions, mises au point et testées pour des batardeaux, peuvent servir d'expérience utile pour des solutions nouvelles et économiques de barrages permanents.

Le Bulletin CIGB 48 a traité de manière détaillée ce problème dont l'incidence sur le coût global des ouvrages est extrêmement variable. Négligeable sur certains grands barrages, il représente souvent directement près de 10 % du coût global et beaucoup plus si on tient compte des conséquences sur le programme et les coûts unitaires; il peut devenir essentiel dans beaucoup de cas.

Un des problèmes souvent posé est la détermination de la crue maximale à dériver pendant les travaux. La réponse est différente pour chaque site et fonction des ouvrages choisis et des phases de construction : on peut accepter la submersion du chantier d'un barrage en béton plusieurs fois par an sur une rivière aux crues très fortes et très courtes mais, pour certains grands barrages en terre, on doit projeter la dérivation provisoire pour la crue de 500 ans ou plus si le coût de la dérivation est faible vis-à-vis des risques courus. Les conséquences d'une submersion des batardeaux ou de l'ouvrage en construction peuvent être faibles ou catastrophiques; les risques pris pendant la construction sont parfois beaucoup moins bien évalués qu'en état définitif et il arrive que les populations situées en aval courent des risques inadmissibles pendant les travaux ou, au contraire, que des dépenses trop élevées soient faites sur les dérivations ou les batardeaux. *Choisir a priori la crue de vingt ans ou cinquante ans pour déterminer les ouvrages provisoires a peu de chance d'être l'optimum en matière de sécurité ou de coût.*

Une des solutions les plus usuelles est la dérivation souterraine avec des vitesses jusqu'à 15 m/s sans revêtement et 20 à 25 m/s avec revêtement. Même si le coût et le délai de réalisation de cette dérivation sont parfois plus importants que prévu à l'origine, cette solution a le grand avantage de permettre une construction continue et avec le minimum de sujétions des ouvrages principaux, et ainsi d'en réduire les coûts unitaires. Pour les débits élevés, on utilise souvent plusieurs galeries semblables; on peut souvent faire une économie en n'implantant qu'une des galeries au niveau le plus bas nécessaire pour réaliser la coupure de la rivière et en implantant l'autre ou les autres galeries à un niveau plus élevé pour en réduire le coût et les dispositifs de fermeture finale. On peut même envisager, pour éviter la submersion d'un barrage en remblai en construction, de compléter les galeries de dérivation par une galerie courte et économique située au-dessus du niveau des batardeaux et servant en fait d'évacuateur provisoire en cours de travaux.

c) For low or moderate height structures on large rivers, to find areas where the valley is wide enough to make it practical to locate all the major structures outside the river channel.

## 6.2. RIVER CONTROL DURING CONSTRUCTION

Technical choices for river control during construction often affect not only direct costs, but the cost of main works; they are also bound up with construction methods : best use should be made of the relevant experience of contractors either by following their advice or leaving them complete or partial responsibility for the design of the relevant temporary works (within a framework of rules regarding the safety of the permanent works and downstream populations). Lastly, various arrangements developed and tried on cofferdams can provide useful experience of new, economical arrangements for permanent dams.

Bulletin 48 “ River Control during Dam Construction ” is a detailed account of river control during construction, whose impact on total construction cost is extremely variable. Although it may be negligible at some large dams, it often directly represents nearly 10 % of the total cost and much more if one considers its effect on the construction programme and unit costs; and it can become primordial in many cases.

A frequent problem is determining the largest river flood to be diverted during construction. The answer is different for each site, depending on the structures chosen and construction phases. A partially-built concrete dam on a river with very large flash floods can be safely flooded several times a year, but diversion works should be designed for the 500 year flood or more for large earth dams if their cost is very small as compared with the risk. The consequences of overtopping of the cofferdams or partially-built dam may be slight or disastrous. Risks during construction are sometimes much less fully investigated than after completion and the public downstream may be exposed to unacceptable risks during construction or on the other hand too much may be spent on diversions or cofferdams. *The habit of unthinkingly setting a twenty or fifty year return period for the construction flood is often very far from the safety or cost optimum.*

One of the most usual solutions is the diversion tunnel with velocities up to 15 m/s without lining or 20-25 m/s with lining. Even if the time and cost of building this type of diversion are sometimes greater than originally foreseen, a tunnel has the great advantage of enabling construction to proceed uninterrupted with the minimum of interference for the main items and of reducing unit costs. For high discharge capacities, several identical tunnels may be used. It is sometimes cheaper to locate only one at the lowest level necessary for river closure, the other(s) being at a higher elevation to reduce cost and make final closure easier. It is even sometimes possible to protect a partially completed embankment dam against overtopping by supplementing the diversion tunnels with a shorter, cheaper tunnel above cofferdam level to act as a temporary spillway during construction.

Il est parfois intéressant d'utiliser une partie des galeries de dérivation pour les ouvrages définitifs (évacuateur de crue, galerie de vidange, galerie de fuite d'une usine souterraine); l'économie réelle est souvent inférieure à l'économie théorique, les coûts unitaires applicables pouvant être différents et les sujétions techniques (spécifications, revêtements, raccordement, etc.) ajoutées aux ouvrages provisoires pouvant peser lourdement sur leur prix et leur délai d'exécution *et l'économie espérée peut parfois être un surcoût global.*

Pour les rivières importantes et les vallées larges, les travaux sont réalisés en deux phases ou plus en isolant successivement par des batardeaux une partie du lit de la rivière. Cette solution a souvent l'inconvénient d'une discontinuité coûteuse dans la réalisation des travaux principaux, et il est souvent souhaitable de limiter le nombre de phases à 2, quitte à élargir provisoirement le lit de la rivière ou à prévoir une submersion des batardeaux en cas de crue exceptionnelle.

Les opérations de coupure de rivière sur le lit naturel, parfois spectaculaires, sont relativement peu coûteuses et assez sûres si elles sont bien étudiées et vérifiées sur modèle réduit et si l'entonnement des ouvrages de dérivation est correctement réalisé. Il est parfois peu coûteux et très utile de pouvoir programmer la coupure de la rivière en dehors des périodes d'étiage.

L'obturation définitive des ouvrages peut utiliser les vannes définitives ou des dispositifs spéciaux. Ceux-ci doivent être étudiés et réalisés avec grand soin, les retards à ce stade étant très coûteux : il est souvent utile de prévoir des dispositifs complémentaires pour faire face à des difficultés imprévues dans cette phase.

Bien que les batardeaux aient un rôle comparable à celui des barrages permanents, ils en diffèrent sur de nombreux points : leur construction doit s'effectuer souvent dans des conditions plus difficiles (délais courts ou présence d'eau ne permettant pas de préparer ou de traiter avec soin la fondation, réalisation rapide indépendante des conditions climatiques, moyens souvent réduits pour le traitement des matériaux...), mais on peut être généralement plus tolérant sur certains points, notamment les tassements ou les fuites, compte tenu du court délai d'utilisation, des moyens disponibles pour des renforcements éventuels, des dommages plus faibles en cas d'accident, et aussi des exigences psychologiques ou contractuelles plus limitées. On comprend donc que, lorsque la conception de tels ouvrages est confiée aux entrepreneurs, les projets sont souvent très différents des projets de barrages classiques, sans qu'il semble d'ailleurs en résulter plus d'accidents ou d'inconvénients que pour les barrages définitifs. Par ailleurs, les conditions de fondation ou de construction des batardeaux peuvent créer des difficultés ou des risques pour l'emploi de certaines solutions classiques comme par exemple les batardeaux à noyau ou à masque amont.

L'extrême diversité des types de batardeaux suivant les pays et les habitudes pour un ouvrage donné ne permet guère de les énumérer. Nous insisterons cependant sur deux points particuliers : possibilité de réalisation sous l'eau et possibilité de résistance au déversement :

— S'il est exceptionnel qu'un barrage définitif soit construit sans mise à sec des fondations, c'est un cas fréquent pour les batardeaux : une des solutions les plus utilisées est basée sur le déversement dans l'eau d'enrochements de dimensions décroissantes vers l'amont, complétés par des matériaux plus fins assurant une étanchéité acceptable. D'autres solutions ont permis la réalisation rapide sous l'eau

It may be convenient to use part of the diversion tunnels for the permanent works, for spillway or bottom outlets or power house tailraces. The actual saving is often less than theoretically possible since the relevant unit costs may differ greatly and the extra specifications, linings, connections, etc., added to the temporary tunnels may heavily handicap their cost and construction time *and the anticipated saving may often turn out to be an extra cost...*

With large rivers and wide valleys, construction is done in two or more phases, with part of the river channel isolated by cofferdams. This often has the drawback of interrupting construction of the main works, which pushes up costs, and it is often desirable to limit the number of phases to two even if this means a temporary widening of the river channel or acceptance of the cofferdams being overtopped by extreme floods.

The sometimes spectacular operations associated with closing the river channel are relatively inexpensive and quite safe if they are properly designed and checked on scale models and the approach and inlet to the diversion works are properly shaped. It is sometimes relatively inexpensive and very useful to be able to schedule river closure at some time other than low flow period.

Final closure may be obtained with the permanent gates or special devices. The latter must be designed and built with great care, since delays at this stage are very expensive. It is often useful to provide back-up devices for unforeseen problems.

Although cofferdams play much the same role as permanent dams, they differ in many aspects. They must often be built in more difficult conditions (short time available and/or in water, so that the foundation cannot be properly prepared or improved, need for rapid construction regardless of weather conditions, often little plant available for processing materials, etc.), but more tolerance is usually possible on certain points such as settlement and leakage because of the short time they are needed, the plant available for consolidating them if necessary, less damage in the event of accidents, as well as the less severe psychological or contractual constraints. It is therefore understandable that, when such structures are designed by contractors, they are often very different from conventional dam designs, without in fact there seeming to be any more accidents or problems than for permanent dams. Conditions in the foundation or during construction of cofferdams may create difficulties or risks when using some conventional designs like embankment dams with central core or upstream facing.

The very great variety of cofferdam types makes it hardly possible to list them all. We do however stress two special points : the possibility of building under water, and the possibility of withstanding overtopping :

— It is very unusual for a permanent dam to be built without dewatering the foundation, but this is common with cofferdams. One of the most widely used arrangements is based on dumping rockfill into the water, with the finer particles arranged towards the upstream side, and then finer material to produce an acceptable degree of watertightness. Other arrangements have enabled structures some

d'ouvrages d'une cinquantaine de mètres de hauteur (Itaipu sur le Parana, Cabora Bassa sur le Zambèze). Les volumes de ces ouvrages sont souvent importants mais les coûts globaux assez réduits.

— Il est souvent rentable, parfois indispensable, de prévoir le déversement des crues importantes sur les batardeaux. Les ouvrages en béton (batardeaux ou barrages) s'adaptent généralement bien à ce rôle; on devrait voir dans les prochaines années un grand développement des batardeaux en béton compacté, bénéficiant des avantages de coût et de rapidité de construction de ce matériau sans qu'une étanchéité éventuellement imparfaite crée d'inconvénient grave : cette solution devrait pouvoir s'utiliser même sur un rocher médiocre et sans traitement important de la fondation à condition que le profil ou le tracé tienne compte des risques de sous-pression.

Le déversement sur des batardeaux en remblai meuble nécessite des protections et des précautions importantes, et il est difficile d'en garantir la sécurité.

Diverses solutions peuvent par contre s'appliquer au déversement sur des ouvrages en enrochement; on doit éviter absolument les déversements de hauteurs importantes sur des massifs d'enrochements non protégés pour des débits supérieurs à 1 m<sup>3</sup>/s/ml; mais on peut admettre les déversements de grands débits sous de faibles hauteurs (de l'ordre de 3 m), ce qui peut être souvent suffisant pour les batardeaux d'ouvrages construits en plusieurs phases.

La protection des talus aval par des barres d'acier ancrées dans le massif d'enrochements peut permettre, sous réserve de nombreuses précautions et d'une quantité totale d'aciers approchant 50 kg/m<sup>2</sup>, des déversements de 10 à 20 m<sup>3</sup>/s/ml sous des dénivelées de 10 à 20 m. Cette solution a été employée avec succès pour des batardeaux ou des barrages en construction, mais en général pour des déversements de durées courtes. Enfin, une protection étanche des talus aval déversants (béton bitumineux, béton armé) a été employée avec succès. Il est possible d'utiliser aussi le béton compacté. De telles solutions peuvent permettre des économies importantes sur le coût des dérivations provisoires, mais nécessitent beaucoup de soins dans l'étude et l'exécution, en se basant sur l'expérience. Elles peuvent être préférables à un accroissement important de la hauteur du batardeau amont qui rend le déversement moins probable mais plus dangereux.

On a souvent tendance, notamment pour gagner de la place, à inclure les batardeaux amont dans les barrages à noyau. L'économie n'est pas toujours évidente, cette solution imposant parfois des sujétions dans la conception et l'exécution du batardeau qui peuvent peser lourdement sur son coût ou son délai de construction.

### **6.3. RECONNAISSANCES, EXCAVATIONS, PRÉPARATION ET TRAITEMENT DES FONDATIONS**

Une part importante des ruptures d'ouvrages est due à la fondation et la recherche d'économie doit être particulièrement prudente dans ce domaine : on peut cependant orienter cette recherche dans les directions suivantes :

Le coût des excavations varie beaucoup en fonction des facilités d'accès, et le projet et le programme doivent en tenir compte. Des talus très raides conduisent à des coûts directs et indirects élevés (délais, risques d'accidents, difficulté de reprise

fifty metres high to be built quickly under water (Itaipu on the Parana, Cabora Bassa on the Zambezi). These cofferdams may contain considerable volumes of material but overall cost is reasonable.

— It is sometimes cost-effective and even unavoidable to plan for large river floods to spill over the cofferdams. Concrete dams and cofferdams are usually well suited for this. The next few years should see considerable growth in rollcrete cofferdams benefitting from this material's low cost and speed of construction without any serious consequences from what may be imperfect watertightness. Rollcrete cofferdams should be suitable even on poor rock without any major treatment of the foundation provided the profile or layout allow for risks of uplift pressures.

Allowing earthfill cofferdams to be overtopped calls for major precautions and protection and it is difficult to ensure safety.

Various arrangements are on the other hand suitable for enabling rockfill structures to be overtopped. Excessive drops on unprotected rockfill for flows in excess of 1 m<sup>3</sup>/s per linear metre of crest must be avoided, but large flows are acceptable under low drops (of the order of 3 m), which may be sufficient, especially with cofferdams for dams being built in phases.

If the downstream rockfill face is protected by means of steel bars anchored in the rockfill, then, with many precautions and a total steel quantity approaching 50 kg/m<sup>2</sup>, discharge rates of 10-20 m<sup>3</sup>/s per linear metre are possible with a 10-20 m drop. This has been done successfully with partially built dams and cofferdams, although usually only for short periods of flow. Lastly, watertight bituminous concrete or reinforced concrete protection to downstream faces has been successfully used. Rollcrete can also be used. Such arrangements can produce major savings on diversion cost but need much care in design and construction on the basis of experience. They may be preferable to any considerable heightening of the upstream cofferdam which makes overtopping less likely but much more dangerous.

Often there is a propensity to incorporate the upstream cofferdam into a zoned embankment dam, to save space particularly. The saving is not however obvious, since this sometimes entails extra constraints in the design and construction of the cofferdam which can weigh heavily in its cost and construction time.

### **6.3. SITE INVESTIGATIONS, EXCAVATIONS AND FOUNDATION PREPARATION AND TREATMENT**

A major proportion of structural failures is due to the foundation and any search for economy must be very prudent in this area. The search may however be guided in the following ways.

The cost of excavation varies greatly with ease of access, and the design and programme must take this into account. Very steep cuts lead to high direct and indirect costs (completion times, accident risk, difficulties of resuming excavation).

des fouilles...). De même la préparation des fouilles et le nettoyage final peuvent être très coûteux et les précautions spéciales doivent être réservées aux zones réellement délicates, une partie des recharges pouvant souvent être fondée de manière beaucoup plus économique.

Il peut être plus économique de réduire l'importance des fouilles dans la partie haute des ouvrages en se fondant sur un rocher de moins bonne qualité, quitte à traiter ce rocher par injections ou parois étanches.

Pour des ouvrages de faible hauteur (moins de 30 m par exemple), l'investissement consacré à l'exploration, au traitement et au contrôle de la fondation ne représente généralement en fait qu'un montant global faible et ne comprend souvent pas de galerie de traitement et de contrôle. Dans ce cas, le risque de percolation et de sous-pression peut être non négligeable, ce qui est acceptable si le choix du type de barrage, son dimensionnement et les dispositions diverses en tiennent compte.

La réalisation d'une galerie de pied, de plus en plus généralisée, au moins pour les ouvrages dépassant une cinquantaine de mètres de hauteur, est assez coûteuse mais tout à fait justifiée pour des raisons de sécurité, de commodité d'exécution des traitements, de contrôle et d'entretien ultérieurs.

Une optimisation de coût entre la géométrie de la galerie et le coût des traitements est à étudier dans chaque cas : des diamètres trop faibles ou des pentes fortes sont généralement à éviter.

S'il est parfois possible de faire des économies sur la consolidation ou l'étanchement du rocher, il est rarement souhaitable de réduire l'importance du drainage par forages ou galeries, dont le coût est généralement réduit et dont le rôle est souvent essentiel pour la sécurité.

La longue liste des ouvrages construits à ce jour apporte la preuve de l'efficacité des techniques classiques utilisées couramment pour le traitement des fondations. Mais le Concepteur dispose également, dans un domaine en constante évolution, de technologies, moyens et matériaux nouveaux dont *l'application peut être une source très importante de diminution globale des coûts et des délais* :

a) Utilisation de méthodes et moyens de perforation rapides, par percussion ou roto-percussion, avec enregistrement des paramètres de forage, en remplacement ou complément des méthodes traditionnelles de sondage de reconnaissance.

b) Utilisation de coulis à haut pouvoir de pénétration permettant de réduire la densité des forages de consolidation et d'étanchéité et par suite les coûts de traitement des fondations par injections.

c) Remplacement, pour les coupures étanches par paroi, des bétons de ciment rigides classiques par des bétons plastiques ou des coulis bentonite-ciment, permettant de diminuer sensiblement les coûts d'exécution tout en autorisant des performances et des profondeurs plus grandes; progrès très importants dans la précision et l'étanchéité des parois.

d) Utilisation de machines de havage pour la réalisation de coupures étanches profondes jusque dans des rochers de résistance mécanique moyenne ou dans les bétons compactés au rouleau.

e) Consolidation, amélioration de l'étanchéité et de la résistance à la liquéfaction par les méthodes d'amélioration des terrains meubles, telles que vibroflotation, colonnes ballastées, jet grouting, compactage par injection (compaction grouting), compactage dynamique.

Preparing the excavated surfaces and final cleaning can also be very costly and special precautions must be kept for really critical zones, since part of the shell or shoulders can often be founded much more economically.

It may be economical to reduce the depth of the foundation excavations near the top of the dam, even if the poorer quality surface rock needs to be improved with grouting or diaphragm walls.

For quite low structures (less than thirty metres high for example), the available capital for foundation exploration, treatment and inspection usually only represents a small amount and often does not include for grouting or exploratory adits. Under these circumstances, the risk of seepage and uplift may not be negligible, although it may be acceptable if the dam type, size and other arrangements take account of this.

A toe gallery, whose use is becoming more widespread, at least for structures more than about fifty metres high, is quite costly. It is entirely justified for reasons of safety, convenience in carrying out additional treatment and subsequent inspection.

Cost optimization between gallery geometry and treatment cost is required at each site. It is usually best to avoid over-small galleries and steep gradients.

While it may be possible sometimes to make savings on rock consolidation or seepage-control grouting, it is rarely desirable to cut down on drainage holes or galleries whose cost is usually small and which are often very important for safety.

The long list of structures built to date is proof of the efficiency of the conventional technologies currently used for foundation treatment. But in a field that is continually developing, the designer also has new technologies available, as well as equipment and materials whose *use can be a very major source of overall reductions in cost and completion times*, e.g. :

a) The use of rapid percussion rotary drilling methods and equipment which records drilling parameters, in place of or in conjunction with traditional exploratory drilling methods.

b) The use of high penetration grouts which reduce the density of consolidation and seepage-control grouting hole patterns and thus the cost of foundation improvement by grouting.

c) Substitution of plastic concrete or bentonite cement slurries for conventional rigid cement concrete cut-offs, with a substantial reduction in construction cost combined with better performance and greater depths; great improvements in high quality and fully waterproof diaphragm walls.

d) Use of grabbing machinery for building deep cut-offs, even in rock of moderate strength and rollcrete.

e) Consolidation, improvement of watertightness and liquefaction resistance by soil improvement methods such as vibroflotation, gravel pack, jet grouting, compaction grouting and dynamic compaction.

L'évaluation des coûts relatifs des solutions possibles peut nécessiter dans certains cas la réalisation de plots d'essai *in situ*, soit au moment de l'établissement du projet pour arrêter un choix, soit au début de la construction pour préciser les modalités d'exécution les plus économiques et les plus efficaces. D'une manière générale, les problèmes et moyens d'exécution ont un rôle essentiel à jouer dans la conception du traitement de la fondation et son influence sur le barrage lui-même.

#### 6.4. ÉVACUATEURS DE CRUE

La part correspondante du prix total des ouvrages est très variable, mais il n'est pas déraisonnable d'estimer qu'en moyenne elle représente plus de 25 % de l'investissement global d'un barrage en remblai. Le sous-dimensionnement des évacuateurs de crue et le non-fonctionnement des vannes représentent par ailleurs une part très importante des causes d'accidents. Des déversements, même d'importance faible, sont particulièrement dangereux pour les ouvrages en remblai non protégé.

Des accidents ou des incidents survenus ces dernières décennies ont conduit sur trois points principaux à une évolution qui paraît devoir être poursuivie avec à la fois un gain sur la sécurité et sur l'économie.

##### *a) Injection d'air*

Les risques de destruction du béton par cavitation sur les coursiers d'évacuateurs de crue ne peuvent être évités pour les très grandes vitesses : des traitements de surface ou l'imposition de tolérances peu réalistes résolvent mal le problème. L'injection d'air dans la lame déversante paraît une solution d'avenir. Son coût, peu élevé, devrait permettre une marge sur le débit d'air correspondant, pour tenir compte d'une certaine imprécision dans le calcul et de la difficulté des essais sur modèle. Son utilisation s'est surtout portée le long des coursiers d'évacuateurs de crue; l'injection d'air sur le seuil déversant (barrage P. K. Le Roux en Afrique du Sud) paraît un peu plus complexe mais efficace également pour des lames déversantes d'une hauteur sur le seuil limitée à 5 m environ. La complexité de ces dispositifs augmente un peu le coût unitaire des parties d'ouvrages correspondantes, mais leur efficacité ou les économies entraînées par ailleurs justifient généralement ce surcoût.

##### *b) Report du jet vers l'aval*

De nombreux évacuateurs conçus il y a quelques décennies prévoyaient une certaine destruction de l'énergie par des obstacles artificiels (rehbocks...) et la protection du lit de la rivière par des protections importantes en béton armé à l'impact de la lame déversante. La tendance actuelle, pour des raisons techniques et économiques, et lorsque la topographie le permet, est d'éloigner (saut de ski, vannes de demi-fond) l'impact du pied des ouvrages en admettant un creusement du lit de la rivière et en protégeant les rives en dehors de la zone d'impact direct. Cette solution semble souvent allier efficacité et économie; elle peut être améliorée dans certains cas en injectant de l'air dans la lame déversante sur le seuil ou le coursier de l'évacuateur.

Estimating the relative costs of alternatives may in some cases require *in situ* trials, either during design to make the final choice, or at the beginning of construction to find the most economical and efficient construction methods. Generally speaking, construction problems and resources are crucial factors influencing the design of the foundation treatment and its impact on the dam.

#### 6.4. SPILLWAYS

The cost of the spillway in proportion to the total cost of the structures is very variable. It is not unreasonable to estimate that, on average, it represents more than 25 % of the overall capital cost of rockfill or earth dams. Undersized spillways and gate jamming represent a very large proportion of dam accidents. Even mild overtopping is particularly dangerous for unprotected embankment dams.

Accidents and incidents that have occurred in recent decades have led to changes under three main headings which it seems must be pursued with benefits in both safety and economy.

##### *a) Air injection*

The risk of destruction of the concrete on spillway chutes cannot be avoided with very high flow velocities. Surface treatment or the imposition of unrealistic tolerances hardly solve the problem. Air injection into the overspilling nappe is a promising solution. Its low cost should allow some margin to be left on the relevant airflow rate to take account of some degree of error in the calculations and the difficulty of performing model tests. It has been used mainly along spillway chutes; air injection at the overspill crest as at P. K. Le Roux dam in South Africa appears somewhat more complex but also effective for nappes with a head on the sill limited to about 5 m. The complexity of these devices does somewhat increase the unit cost of the relevant structures but their effectiveness and the savings they produce elsewhere usually justify the extra cost.

##### *b) Moving impact downstream*

Many spillways designed a few decades ago make use of obstacles such as chute blocks as energy absorbers with substantial reinforced concrete slabs to protect the river bed at the point of impact. The modern approach, motivated by both cost and engineering factors where the topography is suitable, is to move (through ski jump or deep gates) the point of impact away from the dam toe and allow a scour hole to form; outside the impact zone, the river banks are suitably protected. This arrangement does seem to combine efficiency and economy. It may be improved by leading air into the nappe on the sill or chute.

*c) Déversements exceptionnels sur le corps du barrage*

Aux incertitudes importantes qui marquent le choix de la crue de projet s'ajoutent celles du fonctionnement des évacuateurs lors des crues, notamment lorsqu'ils sont munis de vannes : il ne paraît pas irréaliste d'estimer qu'un barrage risque autant la destruction par défaillance des vannes lors d'une crue centennale que par l'apparition d'une crue plus importante que la crue de projet.

Indépendamment de la préférence donnée, à prix équivalent, aux évacuateurs non vannés et à la constitution de digues fusibles, l'adaptation du corps du barrage pour supporter un déversement exceptionnel constitue une mesure possible pour tenir compte de ces incertitudes.

Cette dernière solution a été appliquée souvent avec succès, volontairement ou non, à des ouvrages en béton; il semble d'ailleurs possible, dans de nombreux cas, pour de tels ouvrages, de réduire le coût de l'évacuateur vanné en en réduisant un peu le débit et de consacrer l'économie correspondante à un aménagement de la crête et de l'aval pour supporter avec des dommages limités un déversement exceptionnel. Il semble ainsi possible d'obtenir, à prix égal, une réelle augmentation de sécurité.

Une telle solution, qu'on peut difficilement appliquer aux barrages en terre, ne paraît pas à exclure pour bien des ouvrages en enrochement de hauteur modérée. Un revêtement aval bitumineux ou en béton compacté ou une protection par armatures ancrées semblent acceptables pour des hauteurs d'une vingtaine de mètres. Un revêtement en béton armé ou en béton compacté peut constituer une solution techniquement et économiquement intéressante jusqu'à une cinquantaine de mètres environ; les problèmes de détail d'exécution, de drainage de pied, de raccordements à l'étanchéité et aux berges nécessitent des études et des précautions importantes, mais de telles dispositions pourraient permettre dans certains cas, pour une sécurité réelle accrue, de limiter par exemple l'évacuateur vanné à la crue centennale. Cette solution permettant par ailleurs d'araser le barrage très peu au-dessus de la retenue réduit le volume d'enrochements de manière importante et peut conduire globalement à une économie dans certains cas.

\*  
\*\*

Par ailleurs, des conditions hydrologiques particulières (montée très lente ou très prévisible des crues, emploi exceptionnel des vannes) pourraient permettre parfois des *conceptions plus économiques des évacuateurs de crue et des bouchures*, au lieu des solutions classiques sophistiquées et onéreuses (par exemple, batardeaux démontables ou destructibles au lieu de vannes).

## **6.5. BARRAGES EN REMBLAI**

Sauf pour les très hauts barrages, le coût du corps du barrage en remblai représente généralement moins de la moitié du coût total, l'évacuateur de crue, le contrôle provisoire de la rivière, les excavations et traitements de la fondation représentant une part plus importante. Dans toute comparaison entre divers types d'ouvrages, l'ensemble de ces éléments doit être pris en compte.

*c) Exceptional dam overtopping*

In addition to the characteristic uncertainty factor in selecting the design flood, there is also much uncertainty as to spillway performance during floods, especially with gated types. It seems reasonable to estimate that a dam is as likely to be destroyed by the gates jamming shut during a 100-year flood as by inflow in excess of the design flood.

Aside from the preference, at equal cost, for ungated spillways and breaching dykes, arrangements in the body of the dam to make it resistant to exceptional overtopping is one way of dealing with these uncertainties.

This solution has often been successful, purposely or otherwise, with concrete dams. It in fact seems possible for many such concrete dams to reduce the cost of the gated spillway by slightly reducing its capacity and using the money on crest and downstream protection so that exceptional overtopping will not produce any significant damage. It would seem possible to obtain a genuine increase in safety in this way, at the same cost.

Although hardly suitable for earth dams, this arrangement does appear to be worth considering for many rockfill dams of moderate height. A bituminous or reinforced concrete downstream facing or protection with anchored steel bars seems acceptable for height of about twenty metres. A reinforced concrete or RCC facing may be a technically and economically attractive solution up to about fifty metres or so. Detailed construction problems, toe drainage, and interfaces with cut-offs and the abutments need major study and precautions, but it would seem that such arrangements in some cases could genuinely improve safety while limiting for example the gated spillway capacity to the hundred-year flood and designing the dam body to support overtopping. By allowing the dam to be topped out just above reservoir level, it would substantially reduce rockfill volume and lead to an overall saving in some cases.

\*  
\*\*

In special river conditions where floods have a slow rise time or can be predicted with confidence and gate operation is infrequent, *spillways and gates may not need to be the sophisticated costly structures usually employed* (for instance, crest stoplogs may be used instead of gates).

## **6.5. EMBANKMENT DAMS**

Except for very high dams, the cost of the embankment itself is usually less than half the project cost, with the spillway, river control during construction and foundation excavation and treatment representing a larger proportion. All these components must be considered when comparing different designs.

Le coût unitaire des remblais varie considérablement en fonction des sites, des matériaux choisis, des traitements prévus et des spécifications imposées. La tendance fréquente à réduire les volumes de remblais ne correspond pas toujours à l'économie ni à la sécurité maximale; ceci est notamment vrai des recharges où le volume marginal peut être d'un coût unitaire plus faible et où un plus fort volume d'un matériau d'angle de frottement plus faible peut être à la fois moins cher et plus sûr. Ceci est également vrai pour les barrages en enrochement à masque amont où les qualités demandées aux remblais diffèrent suivant la zone du barrage.

Les granulométries choisies pour les enrochements et les filtres doivent être bien adaptées aux caractéristiques naturelles des matériaux et aux modes d'exécution qu'on peut envisager, les spécifications doivent laisser le plus large choix possible pour les méthodes d'exécution.

Le choix des solutions et des matériaux doit tenir le plus grand compte de l'incidence du climat (pluie, gel...) sur le programme de mise en place des divers matériaux, la régularité d'emploi du personnel et du matériel étant fondamentale pour le coût des travaux.

Le choix des talus amont pour les ouvrages à masque doit tenir largement compte des facilités d'exécution des masques.

Le coût des transports depuis les emprunts et carrières représente une partie importante de la dépense. Les problèmes d'accès doivent être étudiés dès l'origine.

Un des surcoûts importants des ouvrages en remblai provient d'une grande variation dans le temps des cadences mensuelles des différents éléments et notamment des filtres; il est souhaitable de réduire cet inconvénient dans la mesure du possible.

La partie supérieure des ouvrages à noyau comprend, sur une largeur faible, des natures très différentes de matériaux : noyaux, filtres, recharges, protections. La circulation y est souvent difficile et les cadences plus faibles; la largeur totale minimale nécessitée en partie haute par ces différents matériaux impose une sur largeur globale sur toute la hauteur de l'ouvrage (filtres, noyau, ...). Une simplification de la conception sur les derniers mètres de l'ouvrage peut créer une économie substantielle de coût et de temps, d'autant plus que la cadence d'emploi des matériaux les plus coûteux est en général maximale dans cette phase de travaux et pèse sur les coûts et les délais globaux.

## **6.6. BARRAGES EN BÉTON CLASSIQUE**

Les barrages en béton représentaient dans le monde, il y a une trentaine d'années, un tiers des barrages en construction : ce pourcentage est descendu maintenant aux environs de 20 % et de nombreux pays, pour diverses raisons, ne réalisent guère actuellement que des barrages en remblai.

Cette désaffection pour ce type d'ouvrages est due à diverses raisons :

a) Les meilleures sites, mieux adaptés aux barrages en béton, ont déjà été utilisés.

b) Le coût relatif des ouvrages en remblai s'est réduit.

c) L'excès des spécifications et des contrôles du béton a conduit parfois à une augmentation excessive des coûts, pour un supplément de qualité souvent inutile.

Unit costs for fill material vary considerably with different sites, materials, processing and specifications. The frequent tendency to keep fill volume to a minimum is not always concomitant with maximum economy or safety. This is particularly true for the dam shoulder for which the incremental unit cost may be lower than for the main bulk, or the use of more material with a lower angle of internal friction may be both cheaper and safer. It is also true for rockfill dams with watertight upstream facings in which the qualities required of the fill material differ in different zones of the dam.

Grading curves for rockfill and filter material must suit the natural properties of the materials and constructional methods. The specifications should leave as much freedom as possible in choosing construction methods.

The choice of design and materials must take full account of the weather factor (rainfall, freezing temperatures, etc.) affecting the programme of placement of the various types of material, since regular work rates for plant and labour have a fundamental impact on construction cost.

Upstream slope angles where a facing is provided must give full weight to the facilities available for actually building the facing.

Haulage from borrow pits and quarries represents a major proportion of cost. Access problems must be examined very early on.

One of the most serious factors tending to increase costs with embankment dams comes from the fact that monthly work rates may vary considerably for different zones, especially the filters. This should be minimised as much as possible.

In zoned earth dams, many different types of material are placed together at the crest, where the width is narrowest (core, filters, shells, protection). Traffic is then a problem and work may progress more slowly. The minimum widths needed at the crest for these different materials means that some extra thickness has to be provided over the whole height of the dam (filters, core, etc.). A simpler design for the last few metres to the crest may produce substantial savings in time and money, especially as the more costly materials are generally being used most at this time and significantly affect final cost and completion time.

## **6.6. CONVENTIONAL CONCRETE DAMS**

Some thirty years ago, concrete dams represented one-third of all dams under construction. This has now dropped to around 20 % and many countries are only building embankment dams.

There are various reasons for this fall :

- a) The best sites for concrete dams have already been developed.
- b) The relative cost of embankment dams has been falling.
- c) Inflation affecting concrete specifications and quality control has sometimes boosted costs excessively although the extra quality is often unnecessary.

d) Les comparaisons de coût avec les ouvrages en remblai sous-estiment parfois les surcoûts liés aux remblais et les avantages du béton notamment vis-à-vis des déversements : le corps du barrage en béton représente souvent les deux tiers du coût total, celui du barrage en remblai entre un tiers et la moitié suivant l'importance de l'évacuateur de crue. La nature plus aléatoire des constituants des remblais peut entraîner également à l'exécution plus de surcoûts qui ne sont pas toujours pris en compte dans les comparaisons.

### 6.6.1. Barrages-poids

Si leur utilisation s'est beaucoup réduite pour réaliser l'ensemble d'un ouvrage, la réalisation des évacuateurs de crue et des prises d'eau représente des ouvrages souvent importants et les recherches d'économies suggérées ci-dessous s'appliquent aussi, pour la plupart, à ce type d'ouvrage.

#### a) *Caractéristiques du béton : contraintes et étanchéité*

L'action la plus efficace sur l'économie est probablement dans chaque cas une analyse des coûts unitaires du béton en fonction des contraintes et des spécifications imposées afin de distinguer le nécessaire du superflu. Les problèmes d'entretien les plus importants liés à la qualité du béton ont généralement été des problèmes de réaction chimique ou de tenue au gel que l'on doit naturellement examiner avec soin : les problèmes liés à une étanchéité imparfaite sont généralement mineurs et il ne semble pas y avoir d'exemple de rupture ou de dommage grave d'ouvrages en béton liés à la résistance mécanique : c'est cependant dans ces domaines que les spécifications et les contrôles se sont développés le plus et portent à la fois sur les caractéristiques des matériaux, les méthodes de construction et les caractéristiques *in situ* : un allègement est probablement souvent possible sans nuire réellement à la sécurité.

Les contraintes mécaniques demandées au béton sont souvent assez faibles et le coût du béton est souvent renchéri de manière très importante par seul souci d'étanchéité. Séparer les fonctions en assurant une étanchéité amont indépendante (parois ou voûtes minces en béton armé, acier...), en permettant ainsi un béton moins coûteux dans la masse de l'ouvrage, peut être économique dans certains cas, à condition de bien adapter les spécifications du béton aux besoins. La comparaison de coût avec une solution classique semble facile et peu onéreuse.

#### b) *Sécurité en conditions exceptionnelles*

Dans bien des cas, un gain simultané de sécurité et de coût peut s'obtenir en arquant l'ouvrage (rayon de l'ordre de 300 à 400 m). Le faible surcoût d'exécution peut être largement compensé, à sécurité accrue, par une légère réduction de section. Cette solution ne modifie guère les contraintes en service normal, mais accroît considérablement la sécurité en cas de surcharge exceptionnelle (déversement, alluvionnement, séisme) ou de risque de glissement dans la fondation et peut permettre une économie substantielle par réduction de profil à sécurité égale. Des ouvrages-poids anciens de profil trop faible n'ont résisté que grâce à cette disposition. Il est cependant à noter que cette solution, globalement intéressante, augmente un peu le coût des dessins et des études d'exécution.

d) Cost comparisons with embankment dams sometimes underestimate the extra costs associated with embankments and the advantages of concrete, especially as regards overtopping. The dam proper often represents two-thirds of total project cost for a concrete structure but only between one-third and half for an embankment project, depending on spillway size. The less predictable nature of embankment materials as compared with concrete may also lead to extra cost during construction which is not always included in the comparisons.

#### 6.6.1. Gravity dams

Although the gravity design is now less common for the whole structure, it is often used for large spillways and intakes and many of the suggested savings discussed below apply equally well to such structures.

##### *a) Concrete mix design strength and watertightness*

The most effective approach to cost savings is probably a systematic analysis of concrete unit costs versus stress levels and specifications in order to differentiate between necessary and superfluous items. The most important maintenance problems associated with concrete quality have usually concerned chemical reaction and freeze/thaw resistance, which must of course be carefully examined. Imperfect watertightness is generally a minor problem, and there do not seem to be any cases of poor concrete strength being involved with failure or serious damage. Yet it is just these areas that have been given most attention in specifications and inspection procedures in terms of materials properties, constructional methods and *in situ* performance. Some relaxation is probably often possible without any real effect on safety.

Concrete stresses in gravity dams are usually quite low but concrete cost is often substantially increased by the need for watertightness. Thin multiple reinforced concrete arches, steel facings, etc., can be an economical alternative, allowing a cheaper mass concrete to be used in some cases, if the concrete specifications reflect actual needs. Cost comparison with the conventional type of design seems easy and inexpensive.

##### *b) Safety under exceptional conditions*

In many cases, lower cost and improved safety can be had by arching the dam (with a radius of the order of 300-400 m). The slightly greater construction cost can be more than offset by slightly thinning the cross section, and safety will be enhanced. This hardly affects normal stresses but greatly increases resistance under exceptional overloads (e.g. from overtopping, sedimentation or earthquake) or if there is a risk of sliding in the foundation : for a given level of safety, thinning the profile can produce substantial cost savings. There are old gravity dams with cross sections that are too weak which have withstood their loads only because they are arched. It must however be remembered that, although attractive in overall terms, this arrangement does slightly increase the cost of the drawings and detail design.

*c) Simplification des coffrages*

Un gain peut être obtenu par la simplification de forme des coffrages, des joints, des galeries, par de larges tolérances sur les coffrages où la précision est inutile.

*d) Passage de crues importantes en cours de travaux*

Les barrages-poids peuvent en général supporter facilement le passage de crues importantes en cours de travaux, permettant ainsi une réduction du débit dérivé provisoirement : cette facilité n'est pas toujours utilisée suffisamment.

### **6.6.2. Barrages-voûtes**

De nombreuses études ont cherché à déterminer, à contrainte maximale fixée, les formes donnant le plus faible volume de béton, conduisant ainsi à des barrages à double courbure, parfois à des formes difficiles à réaliser.

Le coût de l'ouvrage n'est pas nécessairement proportionnel au volume de béton, les prix de coffrage et même de béton peuvent beaucoup varier suivant la complexité de l'ouvrage et la cadence de bétonnage; certaines formes de voûte permettent par ailleurs une implantation beaucoup plus commode de l'évacuateur de crue.

Pour de nombreux barrages-voûtes de hauteur inférieure à une cinquantaine de mètres, une voûte d'épaisseur constante à parements verticaux peut au total représenter la solution la plus économique. Les coffrages, notamment ceux des joints, sont moins coûteux, il est plus facile d'adapter les fouilles à la cote réelle de fondation, le volume supplémentaire de béton n'entraîne pas nécessairement de surcoût de matériel ou d'installation, et l'appui de l'évacuateur de crue dans la partie centrale de la voûte est souvent plus facile. Enfin, une telle solution est moins dissuasive pour des exécutants n'ayant pas l'habitude de réaliser des voûtes.

Si au-dessus d'une centaine de mètres, les voûtes à double courbure sont plus économiques, il n'est pas toujours souhaitable de rechercher le volume minimal si les formes deviennent trop complexes et surtout si elles obligent à monter la plupart des plots simultanément.

Entre cinquante et cent mètres de hauteur, le choix entre une voûte à double courbure, une voûte à parement amont vertical et parement aval incliné, une voûte à parements verticaux plus épaisse dans la partie centrale n'est pas évident. Il est souvent facile de demander des offres de prix pour diverses solutions afin de connaître la moins coûteuse.

### **6.6.3. Barrages à voûtes multiples ou à contreforts**

En dehors de quelques ouvrages exceptionnels, notamment celui d'Itaipu, ce type d'ouvrage, fréquent il y a quelques décennies, est devenu actuellement très rare, probablement pour les raisons suivantes :

*a)* Le coût des coffrages, notamment de coffrages complexes et inclinés, a dans de nombreux pays augmenté plus vite que le coût du béton, des remblais ou des enrochements.

*c) Simpler shapes*

Savings can be made by simplifying the shapes of formworks, joints, galleries, etc., and by allowing generous tolerances on formworks where high accuracy is unnecessary.

*d) Flood discharge during construction*

A partially-completed gravity dam can usually withstand being overtopped by quite large floods, so that diversion capacity can be smaller. This potential is not always used sufficiently.

### **6.6.2. Arch dams**

There has been much research to find the shapes representing the least concrete volume, for a specified maximum stress. This has led to double curvature arch dams, with shapes that may be difficult to build.

Dam cost is not necessarily proportional to concrete volume. Formwork and even concrete costs can vary greatly with the complexity of the structure and the rate of concrete pouring. Some arch shapes are also more convenient for siting the spillway.

For many arch dams up to about fifty metres in height, a constant thickness arch with vertical faces may in the end be the most economical design. The formwork is less expensive, especially for joints, changes in excavation depth are easily made, the extra concrete volume is not necessarily reflected in higher constructional plant costs and the spillway can easily be placed in the middle of the dam in many cases. Lastly, such designs are less intimidating for contractors with no experience in building arch dams.

Although the double curvature design is the most economical for heights above a hundred metres, it is not always desirable to aim for minimum concrete volume if it means over-complex shapes and, especially, if most of the cantilever blocks have to be built simultaneously.

In the fifty to one hundred metre height range, there is no obvious choice between double curvature, vertical upstream face and inclined downstream face, and vertical faces with dam thickening towards the centre. It is often simple to invite tenders for various designs to find the most economical one.

### **6.6.3. Multiple arch and buttress dams**

Apart from a few exceptional dams like Itaipu, multiple arch and buttress dams, which were common a few decades ago, have now become very rare, probably for the following reasons :

*a)* The cost of formwork, especially when it is complex and inclined, has risen faster than concrete, earthfill or rockfill in many countries.

b) Grâce à leurs progrès de coût et de technique, les barrages en enrochement à masque amont sont généralement moins chers que les voûtes multiples. Les barrages-poids en béton sont plus adaptables aux ouvrages déversants, l'usage du béton compacté pouvant par ailleurs améliorer les coûts correspondants.

Il est cependant à noter que les coûts d'acier sont restés relativement bas et que le coût de coffrages verticaux d'ouvrages minces sur grande hauteur a moins augmenté que le coffrage d'ouvrages complexes. Il est possible qu'un avenir puisse s'ouvrir aux voûtes minces armées verticales pour assurer l'étanchéité d'ouvrages poids divers (béton classique de barrages-poids ou de larges contreforts, béton compacté, contreforts lestés en remblai...).

## **6.7. BARRAGES EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU (BCR)**

Le principe appliqué à tous les ouvrages de ce type est l'utilisation de béton sec mis en place en couches minces et compacté au rouleau en une ou plusieurs couches.

### **6.7.1. Gain de délai important sur de grands ouvrages**

Une bonne utilisation du procédé nécessite donc des surfaces importantes avec le minimum d'obstacles, conduit à une superposition rapide des couches et donc à une montée rapide de l'ouvrage et à des cadences journalières élevées permises par l'emploi de matériel de terrassement. Il est donc intéressant surtout pour des ouvrages importants, dont le projet doit être adapté au procédé.

Le gain de délai conduit déjà généralement à une économie directement et par les facilités ainsi offertes à la maîtrise de la rivière pendant les travaux.

### **6.7.2. Recherches d'économies**

Par ailleurs, le coût unitaire peut varier d'une manière très considérable en fonction des choix sur la qualité et la quantité du liant, la nature et le traitement des granulats, les précautions prises pour la mise en place et les reprises, et on peut envisager, pour un même site et un même type d'ouvrages, des prix unitaires variant de un à deux. En effet, si la faible teneur en eau du béton permet une qualité supérieure à celle d'un béton classique pour un coût unitaire un peu inférieur, la recherche maximale d'économie sur les liants, le choix et le traitement des matériaux, les contraintes à la mise en place peut permettre souvent un béton compacté très économique, mais de résistance mécanique plus faible et d'étanchéité plus réduite ou plus aléatoire. *C'est un choix fondamental*, fonction de l'objectif recherché, des matériaux disponibles, des normes ou règlements applicables.

Il est à craindre que la recherche d'une étanchéité quasi parfaite du béton, la difficulté à alléger les spécifications ou à adapter les projets à un matériau nouveau ne permettent pas de tirer tous les avantages économiques du procédé.

Deux solutions peuvent cependant permettre d'éviter cet écueil :

a) *Adopter les projets et les spécifications au nouveau matériau* en admettant la possibilité que l'étanchéité puisse être éventuellement moins parfaite que celle d'un ouvrage en béton classique.

b) With technical and cost progress, rockfill dams with watertight upstream facings are usually cheaper than multiple arch dams. Gravity dams accommodate the spillway structures more easily and rollercrete methods may also reduce costs.

It must however be remembered that steel has remained relatively cheap and that the cost of vertical formwork for thin, high structures has risen less than for complex shapes. There may be a future for thin, reinforced, vertical arch structures as watertight facings to gravity structures (conventional gravity dams and large buttresses, RCC dams, rubble-filled buttress dams, etc.).

## 6.7. ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC)

RCC is based on dry concrete rolled in one or more thin layers.

### 6.7.1. Substantial time saving on large projects

The requirements for efficient use of this process are large, obstacle-free areas, leading to quick placing of the layers and high daily progress rates through the use of normal earthmoving plant. It is therefore attractive for large structures especially designed for RCC.

The more rapid construction usually leads to savings, both directly and by making river control during construction less exacting.

### 6.7.2. Opportunities for savings

RCC unit prices can vary considerably with the choice of cementitious material quality and quantity, aggregate type and processing, precautions for spreading and construction joints, etc. One can readily imagine costs varying by a factor of two for the same site and type of structure. While the low water content produces a better concrete than a conventional mix at a slightly lower unit price, the desire to economise on cementitious materials quality, materials choice and processing and ease of placement may sometimes mean that the RCC is inexpensive but has lower strength and a poorer, or less predictable, watertightness. *This is a basic choice*, governed by the design, the materials available and relevant standards and codes.

There is a danger that the desire for almost total watertightness, the difficulty of relaxing specifications or failure to design specifically for this new material may prevent its full economic potential from being realised.

There may be two ways of avoiding this difficulty :

a) *Modify designs and specifications to suit the new material* by accepting that it may be less watertight than a conventional concrete.

b) Réaliser le corps du barrage avec le *matériau le plus économique possible* en traitant l'étanchéité de manière *indépendante*, cette solution pouvant éventuellement s'adapter, avec précaution, à des rochers de fondation de moins bonne qualité.

Quelle que soit la solution retenue, le projet d'ouvrages en béton compacté doit différer d'ouvrages en béton classique sur plusieurs points :

a) Le corps du barrage doit comprendre le minimum d'obstacles pour le déroulement du chantier. Les drains et galeries de drainage doivent être étudiés en fonction de l'exécution.

b) Le tracé rectiligne d'un ouvrage poids monobloc est le moins favorable à la stabilité et il est souvent souhaitable d'arquer l'ouvrage.

c) L'utilisation de matériau de qualité mécanique réduite et d'étanchéité aléatoire peut conduire à épaissir le profil.

d) En cas d'étanchéité indépendante, le profil optimal peut être très différent de celui d'un barrage-poids classique.

C'est peut-être dans l'emploi du béton compacté que l'imagination, l'analyse des coûts, la remise en cause des habitudes et des règlements peuvent conduire dans les prochaines années aux plus grands progrès économiques en matière de construction de barrages; mais un effort commun des maîtres d'ouvrages, bureaux d'études et constructeurs est nécessaire pour que cette possibilité soit réellement utilisée.

Il apparaît essentiel pour obtenir les meilleurs résultats de considérer que *les barrages en béton compacté ne sont ni des barrages en béton ni des barrages en remblai mais qu'ils méritent leurs propres normes et leurs projets adaptés.*

*b)* Build the main body of the dam with the *least expensive material available* and treat watertightness *separately*; with proper precautions, this arrangement might be suitable for poorer foundation rocks.

Whichever alternative is chosen, RCC designs must differ from conventional concrete designs on several points :

*a)* The main body of the dam must have few obstacles to allow work to proceed quickly. Drain holes and drainage galleries must be designed with construction in mind.

*b)* A straight monolithic gravity structure is the least stable shape and it is often desirable to arch the dam.

*c)* The use of a weaker material with unpredictable watertightness performance may require a thicker dam profile.

*d)* If a separate barrier is provided for watertightness, the optimum profile may be very different from that of a conventional gravity dam.

RCC may stimulate imagination, cost analysis and a reasonable rethinking of former practices and standards in order to produce the greatest advances in bringing down dam construction costs in coming years : but a joint effort is needed by owners, engineers and contractors if this potential is to be realised.

It appears essential for best progress to consider that *RCC dams are neither concrete dams nor embankment dams but require their own standard methods and designs.*

---

## 7. RECHERCHE DE NOUVEAUX TYPES DE BARRAGES

---

### 7.1. RAISONS D'UNE ÉVOLUTION LENTE DE LA CONCEPTION DES BARRAGES

La plupart des techniques évoluent de plus en plus rapidement et, dans le domaine de la construction, les ouvrages actuels diffèrent souvent beaucoup des ouvrages construits vers 1950 (ponts, routes, ouvrages portuaires ou offshore, bâtiments, ...), mais la plupart des barrages construits actuellement sont semblables aux ouvrages réalisés il y a trente ou quarante ans, même si les moyens pour les réaliser ont beaucoup évolué. *L'évolution semble beaucoup plus lente que pendant la première moitié du siècle.* Les raisons pour une évolution rapide des projets existent cependant comme pour les autres techniques.

*a)* Évolution différentielle des coûts élémentaires : main-d'œuvre, matériaux, matériels.

*b)* Apparition de nouveaux procédés, de nouveaux matériels ou matériaux, évolution des procédés d'exécution.

*c)* Meilleure analyse des causes d'incidents ou d'accidents, nouvelles méthodes et outils plus puissants de calculs et d'essais.

Plusieurs causes peuvent expliquer l'évolution lente des projets de barrages :

*a)* Aucun barrage n'est identique à un autre barrage, ce qui rend plus difficile les comparaisons (cet argument pourrait cependant s'appliquer également en partie à beaucoup de travaux portuaires ou offshore).

*b)* La durée entre le choix du projet d'un barrage et sa mise en eau est généralement longue et l'expérience ne s'acquiert donc que lentement.

*c)* L'innovation peut faire craindre un risque accru d'accidents; cependant *rien ne semble montrer que les barrages innovateurs soient plus dangereux que les autres*; on peut d'ailleurs considérer que l'utilisation pour un nouveau site d'un type d'ouvrage classique est généralement innovatrice puisque les conditions locales sont à chaque fois différentes; *de nombreuses ruptures sont d'ailleurs dues à l'application confiante d'un projet classique à un site ayant une caractéristique inhabituelle* (matériaux, fondation, climat, géométrie...).

*d)* Lors du choix entre solutions, la compétition entre projets et la connaissance de leurs coûts sont souvent moins poussées que dans d'autres techniques de construction; *c'est peut-être la raison qui retarde le plus l'évolution technique des barrages.*

---

## 7. NEW DAM TYPES

---

### 7.1. REASONS FOR PRESENT SLOW PROGRESS IN DAM DESIGN DEVELOPMENTS

At a time when most technology is rapidly changing and, even in the construction industry, modern structures are often very different from those being built around 1950 (bridges, roads, harbour and offshore works, buildings, etc.), most of today's dams are similar to those built thirty or forty years ago, despite enormous changes in the plant and equipment available for the job. *Progress seems much slower than in the first half of the century.* Yet, as in other areas of engineering, there are reasons that justify rapid development in dam designs :

- a) Different component cost trends, i.e. plant, labour and materials.
- b) Appearance of new processes, equipment and materials, progress in constructional methods, etc.
- c) More refined analysis of the causes of incidents and accidents, new and more powerful methods and tools for design and testing.

There are several possible causes which might explain the slower pace of change in dam design :

- a) No dam is the same as any other, making comparison more difficult (although this could also be said in part of much offshore and harbour development work).
- b) A long time usually elapses between the adoption of a dam design and the first filling of the reservoir, so that experience is acquired very slowly.
- c) Innovation may be thought of as increasing the accident risk, although *there seems to be nothing to indicate that innovative designs are more dangerous than others*, and it can also be argued that the use of a conventional design at a new site is in itself innovative, since local conditions are different every time; *many failures are in fact due to overconfidence in an usual design for a site with uncommon features* (materials, foundation, climate, geometry, etc.).
- d) When selecting the design, the competition between alternatives and the accuracy of the cost estimates are not usually at such a high level as in other areas of construction; *this may be the most important factor in slowing down technical progress.*

## 7.2. MOTIFS D'INNOVATION

Il paraît intéressant d'analyser les motifs d'évolution technique et de suggérer quelques directions dans lesquelles les raisons économiques pourraient orienter la recherche de nouvelles solutions.

L'évolution des coûts élémentaires (main-d'œuvre, matériaux, matériel) et des techniques d'exécution a conduit, dans la plupart des pays, depuis quelques décennies, à :

*a)* Une augmentation relative des coûts des éléments nécessitant une main-d'œuvre qualifiée importante et notamment des coffrages complexes ou des ouvrages de faibles dimensions.

*b)* Une stabilité relative du coût des bétons de grande masse (les progrès en matériel étant souvent compensés par des spécifications accrues), des terrassements meubles (l'augmentation de coût des carburants compensant les progrès du matériel), des coffrages nécessitant peu de main-d'œuvre (voiles minces verticaux de grande hauteur...).

*c)* Une baisse relative du coût des déblais rocheux et des enrochements (progrès sur les forages, les explosifs, les engins de chargement...) et des aciers.

Des procédés d'exécution sont apparus ou se sont développés, soit dans le domaine des barrages, soit dans d'autres activités de construction pouvant fournir des expériences utiles pour les barrages :

*a)* Béton compacté.

*b)* Méthodes de reconnaissances et de traitement des sols (performances accrues du matériel de forage et enregistrement des données, amélioration des coulis d'injection, champ d'application et performances accrues des parois moulées, consolidation des sols meubles ou rocheux...).

*c)* Géomembranes et géotextiles, dont le champ d'application pourrait s'étendre malgré quelques problèmes (garantie de longévité, protection, risques de dommages à l'exécution...).

*d)* Dans l'industrie routière, sols-ciments et graves-ciments, sols traités à la chaux, revêtements bitumineux variés, machines slipform, revêtement en béton armé continu et de grande longueur...).

*e)* Terre armée.

*f)* Dans l'industrie offshore, développement, sous des pressions hydrauliques élevées et dans de strictes conditions d'étanchéité et d'entretien, de structures métalliques en tôles ou tubes soudés ou de structures minces en béton armé de très grandes dimensions.

Enfin, le développement de nouveaux modes de pensée pour l'analyse de risques, de méthodes et de moyens beaucoup plus puissants de calcul et d'essais, de la mécanique des sols et de la mécanique des roches, facilite l'étude aussi bien des solutions classiques que de solutions plus innovatrices.

## 7.2. REASONS FOR NEW DESIGNS

It may be useful to examine the motivations for innovation and suggest a few ways in which economic targets might guide research towards new designs.

Changes in plant, materials and labour costs and constructional methods have had the following effects in most countries over some decades :

*a)* Relative rise in cost of items needing a large skilled workforce, such as complex shuttering and small structures.

*b)* Relative stability in cost of mass concrete (improvements in plant often being offset by more stringent specifications), common excavation (higher fuel costs being matched by more efficient plant) and shuttering needing little labour (thin, high vertical walls, etc.).

*c)* Relative drop in cost of rock excavation and rockfill (progress in drilling, explosives, loading plant, etc.) and steel.

Construction procedures have appeared and been improved both in connection with dams and other parts of the construction industry which have provided useful experience for dam engineering :

*a)* Roller compacted concrete.

*b)* Site exploration and treatment methods (more efficient drilling equipment with recording of drilling parameters, improved grouts, improvements in diaphragm walls and increased range of application, consolidation of soils and rock, etc.).

*c)* Geomembranes and geotextiles which could be used more widely despite a few problems (durability, protection, risk of damage when laying, etc.).

*d)* In the road industry, soil stabilization with lime, soil-cement and gravel-cement, various bituminous pavements, slip form pavers, long jointless reinforced concrete pavements, etc.

*e)* Reinforced earthfill.

*f)* In offshore engineering, development of very large, thin reinforced concrete structures and welded plate or pipe rigs for high water pressures, with stringent watertightness and maintenance requirements.

Lastly, the growth of new approaches to risk analysis, much more powerful analytical and testing methods and equipment, developments in soil and rock mechanics, etc., have made the designer's task easier for conventional, as well as for more innovative structures.

## 7.3. POSSIBILITÉS D'ÉVOLUTION DE DIVERS TYPES DE BARRAGES

Un barrage remplit en fait trois fonctions différentes :

- a) Résistance à la poussée de l'eau et aux sous-pressions.
- b) Étanchéité.
- c) Passage des crues pendant l'exploitation et parfois pendant la construction.

L'influence de ces différentes fonctions sur les coûts varie suivant les types d'ouvrages et son analyse peut permettre d'orienter la recherche de nouvelles solutions plus économiques.

### 7.3.1. Barrages en remblai fondés au rocher

Chacune des trois fonctions définies ci-dessus (résistance, étanchéité, passage des crues), assurée souvent par des matériaux ou des structures différents, représente une part importante du coût total; pour des ouvrages de hauteur modérée, la première fonction (résistance) n'est généralement pas la plus coûteuse, alors qu'elle le devient généralement pour les ouvrages de grande hauteur.

La partie résistante de l'ouvrage constituée par le corps du barrage ou la recharge aval est fixée suivant la nature des matériaux disponibles sur le site; c'est donc toujours un cas particulier et il est difficile de faire des suggestions générales sur ce point.

La fonction étanchéité est assurée par le corps du barrage, par un noyau, par un écran interne, ou par un masque amont. C'est dans le domaine des masques et des écrans, constitués de matériaux artificiels, qu'il paraît possible de développer des solutions peu utilisées ou d'envisager des solutions nouvelles.

a) Les masques amont les plus usuels sont en béton armé ou en matériaux bitumineux divers, avec quelques essais de géotextiles susceptibles de développer pour les hauteurs modérées si les problèmes de longévité et de protection peuvent être bien résolus. Il est surprenant, sur le plan des coûts, qu'on n'utilise pas plus souvent de masques en acier, compte tenu de la baisse du prix de fourniture, des progrès considérables en métallurgie, en soudure, en protection anticorrosion. Ce masque présente, par rapport à la solution classique en béton armé, l'avantage de pouvoir mieux suivre la montée du barrage et de s'adapter plus facilement à des déformations de l'ouvrage; le problème des dilatations thermiques paraît soluble sans difficultés importantes. L'emploi d'acier inoxydable peut également être une solution intéressante.

b) Les écrans internes sont relativement peu utilisés; ils peuvent constituer dans le futur une solution économique, qu'il s'agisse de parois en béton bitumineux déjà utilisées avec succès dans quelques pays, de parois minces en béton très armé, d'écrans en acier, enfin de parois moulées compte tenu des grands progrès correspondants sur la composition, l'étanchéité, les performances de réalisation. Cette dernière solution peut être utilisée également pour la restauration d'étanchéité défectueuse de barrages existants.

On a parfois reproché aux écrans internes la difficulté de réparation en cas d'incident : il est possible de réduire l'inconvénient correspondant en disposant des remblais fins en amont de ces écrans pour colmater des défauts éventuelles et en assurant un drainage à l'aval.

### 7.3. TRENDS FOR NEW DESIGNS

A dam in fact fulfills three functions :

- a)* It resists reservoir and uplift pressures.
- b)* It provides adequate watertightness.
- c)* It discharges floods during operation, and sometimes during construction.

The impact of each function on costs varies with dam type and it can be analysed to guide the search for new more economical designs.

#### 7.3.1. Embankment dams on rock foundation

Each of the three functions (strength, watertightness, flood discharge), often provided by different materials or structures, represents a large proportion of the total cost; for dams of moderate height, the first function (strength) is not usually the most expensive, but it generally is for a very high dam.

The body of the dam or the downstream shell providing the strength is determined by the materials locally available. Each site is different, making it difficult to suggest any general considerations on this point.

Watertightness is provided by the body of the dam, by the core, by a core wall or by an upstream facing. Core walls and facings, built of man-made materials, appear to offer the best opportunities for making more use of unusual designs or devising new types :

*a)* The more common upstream facing is made of reinforced concrete or some type of bituminous material; there have been trials with geotextiles that might be developed for moderate heights, if the problems of durability and protection can be successfully solved. From the point of view of cost, it is surprising that more use is not made of steel, in view of the drop in price and modern achievements in metallurgy, welding and corrosion protection. As compared with a conventional reinforced concrete facing, steel could be installed as the dam fill rises and adapt itself more easily to dam deformations. Thermal expansion would not seem a difficult problem to solve. Stainless steel may also be attractive.

*b)* Core walls are rare, but might be an economical alternative in the future; they might consist of bituminous concrete already used successfully in a few countries, densely reinforced thin concrete and even steel; cast-in-place diaphragm walls seem suitable in view of the progress in mix design, watertightness and construction efficiency. Diaphragm walls could also be used to restore watertightness in existing dams.

Core walls have sometimes been criticised as difficult to repair if damaged. This can be partially overcome by placing fine material against them on the upstream side, to seal any defects, and by ensuring efficient drainage of the downstream shell.

c) Il n'est pas exclu, pour certains ouvrages ou certaines parties d'ouvrages, d'envisager une étanchéité imparfaite permettant un ouvrage très économique : si une telle solution est naturellement totalement à exclure pour les barrages en matériaux fins, elle est envisageable pour des ouvrages en enrochement et a été réalisée avec succès pour des batardeaux constitués de matériaux de granulométrie se réduisant progressivement vers l'amont et simplement déversés dans la rivière. De même, plusieurs barrages ont été réalisés avec succès par mise en place directe de massifs d'enrochements par très grands sautages, notamment en URSS. Enfin, de nombreuses digues en alluvions de faible hauteur n'ont qu'une étanchéité toute relative. Si de telles solutions ne peuvent être utilisées qu'avec précaution, elles peuvent être très économiques et très rapides d'exécution et permettent éventuellement des économies importantes sur la préparation et le traitement de la fondation et sur le contrôle de la rivière pendant les travaux : on peut rappeler également que des rideaux de palplanches, posés en avance des remblais, peuvent constituer une étanchéité économique suffisante dans bien des cas moyennant quelques précautions et s'adaptent à des remblais médiocres et à des mouvements éventuels, d'où une économie indirecte très importante.

#### **Déversement sur barrages en remblai**

Le coût des barrages en remblai est souvent majoré de façon très importante par le coût des évacuateurs de crue indépendants et du contrôle de la rivière pendant les travaux. Il semble possible, dans le cas de certains barrages en enrochement, d'admettre le déversement en cours de travaux ou d'exploitation. Des observations ont été faites sur ce point au chapitre 6.

#### **7.3.2. Barrages en remblai non fondés au rocher**

La plupart des solutions suggérées ci-dessus (étanchéité imparfaite, déversement, masques amont, ...) sont inapplicables. On peut cependant concevoir certaines variantes à écran interne si on peut descendre l'écran au rocher ou si on peut le relier de manière sûre au voile d'étanchéité.

C'est probablement dans l'utilisation des parois moulées que le développement le plus important peut être envisagé.

#### **7.3.3. Barrages en béton ou béton compacté**

Les matériaux disponibles au voisinage du site du barrage permettent parfois la réalisation de bétons économiques, de caractéristiques mécaniques réduites, mais utilisables pour beaucoup de barrages-poids, à condition que le problème d'étanchéité soit résolu séparément. Il semble que c'est dans cette voie que la recherche d'économie soit la plus prometteuse, surtout pour les bétons compactés dont les caractéristiques et le coût peuvent même s'approcher de ceux de graves-ciments ou sols-ciments, quitte à ce que les profils des ouvrages soient adaptés en conséquence.

On peut concevoir pour les ouvrages de hauteur modérée que l'étanchéité soit constituée par l'emploi, en parement amont, de béton de meilleures caractéristiques, avec éventuellement le risque de faibles fuites. Pour les ouvrages de hauteur importante, il peut être plus intéressant de prévoir une étanchéité plus coûteuse mais pouvant supporter sans dommage des fissurations éventuelles du corps du barrage dues notamment aux contraintes thermiques, au retrait ou à des tassements diffé-

c) For some structures or parts thereof, it might also be possible to imagine watertightness being less than perfect, in order to obtain an extremely economical structure. While this is unconceivable for earth dams, it might be feasible for rockfill structures and has been successfully done with cofferdams, built of material whose grading gradually becomes finer towards the upstream face, and which are dumped in the flowing water. Several dams have been successfully built, simply by blasting large amounts of quarry rock directly into the river, as in the USSR. Lastly, some low alluvium dams are less than completely watertight. Although this approach must be used with great caution, it can nevertheless be very economical and quick to build and might be productive of considerable savings on foundation preparation and treatment and river control during construction. It might also be remembered that sheet piling driven before the fill is placed can provide adequate watertightness economically in many cases, subject to a few precautions: sheet piling is suitable for poor quality fill that may deform or settle, and offers large indirect savings.

#### **Overspill Embankment Dams**

The cost of embankment dams is often substantially increased by the need for independent spillways and adequate river control during construction. With some rockfill dams however, it might be acceptable to tolerate overtopping during or after completion of construction. Comments on this point have been made in Chapter 6.

#### **7.3.2. Embankment dams on soft foundation**

Most of the above suggestions (imperfect watertightness, overtopping, upstream facings, etc.) are not feasible if the dam is to be built on soft foundation. Variants of the core wall concept can however be imagined if it can be continued down to bedrock (to provide a positive cut-off) or joined up with the grout curtain in a reliable manner.

Cast-in-place diaphragms probably have a promising future.

#### **7.3.3. Concrete and RCC dams**

Materials usually available near a dam site are often suitable for cheap, second quality concrete suitable for gravity dams provided the watertightness problem is solved separately. This would seem to be the most promising avenue for making savings, especially with RCC, whose properties and cost may be very similar to soil-cement or gravel-cement, if dam profiles are designed to suit.

With low dams, the watertightness might conceivably be provided by an upstream facing of good quality concrete, perhaps with some risk of slight leakage. With higher dams, it might be better to provide a more costly system capable of withstanding, without damage, cracking in the body of the dam due to unavoidable stresses, shrinkage or differential settlement. The concept of treating watertightness separately can lead to profiles that are very different from the usual triangular

rentiels. La conception d'une étanchéité séparée peut ouvrir la voie à des profils différents des profils poids triangulaires classiques basés sur les problèmes de sous-pression dans l'ouvrage. Si le parement amont reste vertical, la réalisation de l'étanchéité par des parois minces ou des voûtes minces en béton très armé peut être une solution pratique et économiquement intéressante, mais d'autres profils peuvent être envisagés : par exemple, un profil symétrique conduit à des contraintes plus faibles et bien réparties sur la fondation.

L'existence d'une étanchéité indépendante efficace peut éventuellement permettre l'implantation, dans certains cas, de barrages-poids sur une fondation rocheuse médiocre susceptible de tassements différentiels, si le projet prend bien ce risque en compte.

Dans le cas où la vallée permet d'arquer utilement un barrage-poids et où il est intéressant d'utiliser, avec étanchéité indépendante, un béton compacté de qualités mécaniques limitées, le dessin de la voûte épaisse peut être très différent de celui des voûtes classiques.

Notons enfin que la baisse relative du coût des aciers peut conduire à un développement de leur utilisation dans les barrages en béton, et même dans le béton compacté si l'on se limite à des aciers horizontaux.

#### **7.3.4. Barrages mixtes béton-remblai**

Alors que les barrages en remblai associent de manière très variée des matériaux naturels et artificiels très divers, il n'y a guère d'exemples d'association, dans un même profil, de remblai et de béton à l'exception des barrages en enrochement à masque amont, de quelques barrages-poids en béton étayés par un remblai aval, et de quelques batardeaux.

Une des raisons en est probablement la difficulté pratique de faire voisiner sur un chantier une activité terrassement et une activité béton; les masques amont s'exécutent d'ailleurs après achèvement des remblais. Cette raison ne s'applique guère au béton compacté, dont l'exécution s'apparente à celle des remblais.

Une autre raison est peut-être la tradition d'une classification tranchée entre ouvrages en remblai et ouvrages en béton, qui exclut naturellement la recherche de solutions mixtes. Le développement du béton compacté pourrait être une raison, parmi d'autres, pour reconsidérer cette exclusion.

Une analyse de coûts semble montrer qu'il existe de très nombreuses possibilités dont quelques exemples, détaillés dans un rapport français joint au Bulletin (Annexe E), sont résumés ci-dessous.

##### *a) BCR et Remblai*

La partie non déversante de barrages de hauteur modérée peut être constituée par un noyau en béton compacté économique, encadré par deux recharges en remblai (une telle solution a déjà été utilisée pour des batardeaux). L'ouvrage peut être conçu comme un ouvrage rigide, les recharges ayant un rôle de lest, de coffrage, d'accès à la partie haute du béton pour les engins de transport. Les bétons et remblais ne nécessitent pas de spécifications coûteuses; le risque de percolation à travers un béton compacté économique peut être très réduit en plaçant immédiatement en amont un remblai permettant le colmatage des fissures éventuelles. Si le remblai aval est imperméable, on doit aussi placer un matériau drainant immédiatement en aval du béton.

gravity shape based on internal uplift considerations. The upstream face may still be vertical, but thin concrete arches or facings with a high density of reinforcement may be an attractive, convenient and economical solution. Other solutions are also conceivable; a symmetrical profile, for example, leads to lower, distributed foundation stresses.

A separate, efficient watertight component might even allow gravity dams to be sited, in some cases, on poor rock subject to differential settlement if due allowance is made for this risk in the design.

If the valley is suitable for an arch gravity dam and if moderate strength RCC with separate watertightness is acceptable, the resulting thick arch dam may be very different from conventional arch designs.

Lastly, the relative drop in the cost of steel may encourage designers to reinforce concrete dams, and even RCC dams if all the bars are kept in horizontal planes.

#### **7.3.4. Hybrid concrete/embankment dams**

Whereas embankment dams incorporate a great variety of very different natural and man-made materials, there are hardly any examples of dams combining fill and concrete in the same cross section, except for rockfill dams with upstream facings, a few concrete gravity dams shored up with rockfill on the downstream side and a few cofferdams.

One of the reasons is probably the practical difficulty of having earthmoving proceed side by side with concrete construction on the jobsite; upstream facings are usually built after all the fill has been placed. This is hardly a problem with rollcrete, which is placed in the same way as earth and rock.

Another reason may be the traditionally sharp distinction between embankment dams and concrete dams, preventing any consideration of such hybrids. Interest in rollcrete may be one reason among others for reconsidering this compartmentalization.

Cost analysis would appear to indicate many possibilities; a few examples described in more detail in the accompanying French report (Appendix E) are briefly presented below.

##### *a) RCC and fill*

The non-overspill parts of moderately high dams might consist of an inexpensive rollcrete core flanked by shell material (this has already been done with some cofferdams). The dam might be designed as a rigid structure, the shells providing weight, containment (like shuttering) and access for equipment to the higher parts. Costly specifications are not necessary for the RCC or fill; the risk of seepage through a cheap RCC can be greatly reduced by placing against the upstream face materials able to seal any subsequent cracking. With a not-free-draining downstream rockfill, drain material should be placed in contact with the downstream face of the RCC.

Dans la partie déversante de l'ouvrage, on supprime la recharge aval et on adapte le profil du béton compacté.

Différentes solutions peuvent être envisagées aussi bien pour les profils que pour le tracé en plan, la partie déversante pouvant par exemple être légèrement arquée.

*b) Voûtes multiples verticales remblayées*

On peut envisager des barrages à voûtes multiples verticales en béton armé minces s'appuyant sur des contreforts en béton armé pour les hauteurs faibles (moins de 20 à 30 m) ou en béton compacté pour les hauteurs plus importantes. Les contreforts sont lestés par du remblai, soit directement, soit par effet de silo. Une telle solution paraît attractive sur le plan économique et a fait l'objet d'avant-projets détaillés, mais son adaptation au déversement est assez coûteuse et il semble préférable de lui associer un évacuateur, par exemple en béton compacté massif.

*c) Noyau incliné et barrages-poids*

Dans les deux solutions ci-dessus, il s'agit en fait d'ouvrages rigides dont l'étanchéité est assurée essentiellement par le béton ou le béton armé.

Une solution d'un principe totalement différent est inspirée des barrages chinois du type Zhaogushe, tel que décrit dans le paragraphe 3.8.3. « Barrage en remblai à déversoir central » du Bulletin CIGB n° 63 « Nouvelles Méthodes de Construction » publié en 1987. La partie amont du barrage est analogue à celle d'un barrage en enrochement à noyau incliné ou à masque amont, la partie aval est constituée par un mur poids en béton compacté permettant le déversement. Ce mur supporte un effort plus faible que celui d'un barrage-poids et ne nécessite pas d'étanchéité; son volume et son coût unitaire sont donc inférieurs à ceux d'un barrage-poids. Le coût global paraît voisin de celui d'un barrage en enrochement mais on économise l'évacuateur indépendant. Cet ouvrage peut être arqué.

\*

\*\*

Les exemples ci-dessus ne sont que des exemples parmi beaucoup d'autres possibilités et il n'est pas exclu que l'association, sous des formes très diverses, de remblais meubles ou d'enrochements avec le béton compacté ou le béton armé ouvre de grandes possibilités sur les terrains de fondation rocheux, même parfois de qualité médiocre. Cependant de tels projets nécessitent des études détaillées et un développement progressif.

There would be no downstream shell behind the overspill section and the profile of the RCC structure would be suitably modified.

Various arrangements could be devised for the dam profile and plan, e.g. the overspill section might be slightly arched.

*b) Vertical multiple arches with fill-weighted buttresses*

One can imagine thin, vertical, multiple arch dams in reinforced concrete bearing against reinforced concrete buttresses for moderate heights (less than 20-30 m) or RCC buttresses for higher designs. The buttresses would be weighted with fill material, either directly or by silo effect. This appears attractive in terms of cost and detailed designs have been prepared; modifications to permit overspilling however are quite costly and it would seem preferable to provide a proper spillway, from mass RCC for example.

*c) Sloping core against gravity wall*

The above two arrangements are for rigid structures made watertight chiefly by concrete or reinforced concrete.

An alternative based on a totally different principle derives from Chinese dams like Zhaogushe, described in para 3.8.3. " Fill dams with central overflow sections " of ICOLD Bulletin 63 " New Construction Methods " published in 1987. The upstream part is similar to a rockfill dam with sloping core or upstream facing, but on the downstream side, there is an RCC gravity wall suitable for overspilling. The load on this wall is less than on a gravity dam and it does not need to be watertight; RCC volume and unit cost are thus both less than for a gravity dam. The overall cost seems to be similar to that for a rockfill dam but no separate spillway structure is needed. This type of dam may be arched.

\*  
\*\*

The above examples are only a few among many possibilities and it is not unlikely that some form of combination of earth or rockfill with rollcrete or reinforced concrete may offer good opportunities on even sometimes poor rock foundations. However, such new schemes need very careful studies and progressive development.

---

## 8. MÉTHODES D'EXÉCUTION

---

Les méthodes d'exécution, usuelles ou nouvelles, sont étudiées de façon détaillée dans d'autres Bulletins et particulièrement dans les Bulletins préparés par ailleurs par le Comité de la Technologie de Construction des Barrages. Il n'est donc pas utile d'y revenir ici, si ce n'est pour faire quelques suggestions générales permettant de faciliter les économies dans ce domaine.

Les méthodes d'exécution sont très variables suivant les pays et suivant les sites, en fonction des conditions économiques locales et des problèmes techniques posés. Ces méthodes évoluent dans le temps et ne manqueront pas d'évoluer dans le futur. Mais deux principes doivent s'appliquer généralement pour obtenir les solutions les plus économiques :

a) Laisser la plus grande liberté possible sur le choix des méthodes d'exécution.

Beaucoup de cahiers des charges imposent de trop nombreuses spécifications sur les méthodes d'exécution : si certaines de ces spécifications sont utiles ou même indispensables, beaucoup sont reprises de règles générales établies il y a des années et peuvent être éventuellement coûteuses compte tenu du cas particulier ou de l'évolution des méthodes ou des moyens d'exécution. Imposer, par exemple, un pourcentage de gros matériaux dans un barrage en enrochement peut être justifié ou non, mais interdit le transport par bande transporteuse de matériaux préconcrétés qui peut être une solution économique. De même, le transport du béton par pompe ou bande transporteuse peut être interdit de fait par les spécifications sans que ce soit toujours justifié.

Si donc le projet doit tenir le plus grand compte des problèmes d'exécution, c'est en laissant le plus grand choix possible entre les méthodes techniquement valables, quelles soient usuelles ou innovatrices.

Il existe cependant un domaine où les spécifications et les obligations de l'entrepreneur devraient être souvent renforcées : c'est celui de la sécurité du personnel; dans beaucoup de pays, *l'imposition de règles strictes sur ce point a permis de réduire de manière spectaculaire les accidents pendant les travaux et, en fait, le coût des travaux eux-mêmes.*

b) Inciter les exécutants à rechercher les choix les plus économiques.

Ce résultat est généralement obtenu lorsqu'il y a compétition entre les exécutants éventuels pour obtenir le contrat : c'est d'ailleurs l'avantage essentiel de l'adjudication au moins-disant, solution qui a, par contre, l'inconvénient de demander un délai important d'étude et parfois de choix. L'expérience montre généralement que l'avantage l'emporte sur l'inconvénient, sous les réserves indiquées ci-dessus au chapitre 5.

---

## 8. CONSTRUCTIONAL METHODS

---

Conventional or new constructional methods are examined in detail in other Bulletins such as those issued by the Committee on the Technology of Dam Construction. This need not be repeated here except to put forward a few suggestions of a general nature that might promote savings.

Constructional methods vary greatly from one country and jobsite to another by reason of the different local economics and engineering problems. Methods evolve and change and will continue to do so in the future. Two principles must be observed to arrive at the greatest economy :

*a)* Leave as much freedom as possible in the choice of constructional methods.

Many specifications stipulate abundant requirements on constructional methods. While some are useful and even indispensable, others merely repeat general rules established many years previously and may even push up costs in particular circumstances, or where plant and methods have changed. For example, specifying a certain percentage of large blocks in a rockfill dam may or may not be justified, but it effectively prevents the use of belt conveyors for materials from primary crushers, which may also be an economical alternative. Concrete delivery by pump or conveyor may be prohibited for no justifiable reason.

The best way for design to take full account of construction factors is to leave the widest possible choice between habitual or innovative, but technically valid constructional methods.

One area where, on the contrary, there might well often be more stringent specifications and demands on the contractor concerns safety of workmen; *strict rules in many countries have had a spectacular effect in reducing accidents and, in fact, costs.*

*b)* Encourage the contractor to find the most economical arrangements.

This is usually done by competition between potential contractors for the contract. It is in fact the greatest advantage of awarding the contract to the lowest tenderer although it has the drawback of requiring considerable time to be allowed for tender preparation and, sometimes, contract award. Experience shows that the advantages generally outweigh the disadvantages, subject to the reservations discussed in Chapter 5.

---

## 9. RÉSUMÉ ET CONCLUSION

---

*Les surcoûts actuels que l'on pourrait éviter sont en fait, tôt ou tard, supportés pour l'essentiel par les Maîtres d'Ouvrages. Sans nuire à la sécurité des ouvrages, ni à celle du personnel travaillant sur les chantiers, des économies importantes pourraient être obtenues lors de l'étude ou de la construction de nombreux barrages.*

### 9.1. ÉTUDES

La recherche d'économie est souvent axée principalement sur une réduction de volume qui, en général, n'améliore pas la sécurité et qui ne conduit pas nécessairement à une réduction du coût global. *C'est d'une réduction des coûts unitaires et non des volumes que peuvent venir les économies les plus importantes*, mais cette réduction est plus complexe et son évaluation plus difficile.

Les économies sur coûts unitaires dépendent naturellement de l'organisation et de l'efficacité des exécutants, mais les choix au moment des études ont également une influence considérable. Les réductions de coûts unitaires liées aux études peuvent résulter :

- de la disposition générale des ouvrages facilitant accès, installations de chantier, maîtrise de la rivière pendant les travaux, ...;
- de l'optimisation économique du programme, permettant si possible une utilisation assez régulière du personnel et du matériel;
- de spécifications bien adaptées à l'ouvrage et aux contraintes réelles, en évitant d'ajouter des spécifications inutiles et coûteuses;
- de l'optimisation détaillée des projets pour faciliter l'exécution et réduire les délais.

Les Ingénieurs Conseils expérimentés connaissent ces problèmes, mais en sous-estiment parfois l'importance; ils peuvent rarement analyser suffisamment les coûts pour quantifier avec précision l'intérêt relatif des différentes options; celles-ci peuvent être nombreuses et des options innovatrices très économiques peuvent être omises : le projet choisi peut donc être parfois très loin de l'optimum.

Par ailleurs, malgré l'évolution technologique et économique, la forme et les dispositions des barrages n'évoluent que lentement depuis quelques décennies.

Par contre, dans la plupart des autres domaines de la construction (ponts, tunnels, bâtiments, routes), les ouvrages actuels sont très différents des ouvrages construits il y a cinquante ans : cette évolution a grandement amélioré performances et économies sans nuire à la sécurité; elle résulte souvent d'une bonne connaissance des coûts et d'une comparaison chiffrée précise au moment du choix entre diverses solutions classiques ou innovatrices.

---

## 9. SUMMARY AND CONCLUSION

---

*Most of unjustified extra costs are actually, sooner or later, paid by the owners.* Major savings could be obtained in the design and construction stages of many dams, without prejudicing structural safety or the safety of the men working on the jobsite.

### 9.1. DESIGN

Cost consciousness at the design stage usually focuses on achieving minimum volume which does not usually improve safety and does not necessarily lead to a reduction in the total cost. *It is by reducing unit costs rather than volume that the most savings can be made,* but this is more complex and it may be difficult to estimate.

Savings on unit costs are of course dependent on the organization and efficiency of the construction staff, but design decisions also have a considerable impact. Reduced unit costs produced at the design stage may result from :

- the general arrangement of the works improving access, site installations, river control during construction, etc.;
- economic optimization of the construction programme, providing, if possible, for regular operation of plant and manpower;
- specifications appropriate to the structure and actual requirements, without adding needless, costly stipulations;
- detailed project optimisation to speed construction.

Experienced consulting engineers are aware of these issues but sometimes underestimate their importance. They are rarely able to analyse costs to the degree where they can fully quantify the relative benefits from different options. Many alternatives may be feasible and cost-efficient but innovative ones may be overlooked, so that the final choice is far from being the best design.

Dam shapes and layouts have been changing only slowly over the last few decades, despite progress in technology and cost efficiency.

Whereas in most other parts of the construction industry (bridges, tunnels, buildings, roads) today's designs are very different to what was being built fifty years ago. These changes have greatly improved performance and cost factors without being detrimental to safety. They are often rooted in accurate knowledge of actual costs and precise costed comparisons for selecting between conventional and innovative alternatives.

Cette comparaison est plus difficile dans le cas des barrages. Leurs coûts unitaires varient beaucoup en fonction du site et des solutions étudiées et ne peuvent être précisés sans une étude analytique détaillée : *le plus souvent, le choix d'un barrage se fait donc sans comparaison suffisante des solutions envisageables*; ceci peut conduire à répéter des modèles anciens et à écarter des solutions plus économiques surtout si elles comportent des formes ou des dispositions nouvelles.

Diverses procédures peuvent contribuer à remédier à cette difficulté :

— Mettre en adjudication plusieurs solutions (étudiées par un ou plusieurs Ingénieurs Conseils).

— Accepter, dans certains cas et sous certaines conditions, des solutions variantes proposées par les Entrepreneurs pour les travaux provisoires et tout ou partie des ouvrages définitifs.

— Demander, après études hydrologiques et reconnaissances du sol, des propositions clefs en main, incluant études et travaux.

Les diverses procédures ci-dessus, adoptées par quelques Maîtres d'Ouvrages, sont un peu plus coûteuses en études initiales, mais peuvent permettre des réductions très importantes du coût global et faciliter l'évolution de tous les barrages vers une meilleure économie.

## 9.2. CONSTRUCTION

Malgré quelques inconvénients, la solution la plus efficace pour choisir l'Entrepreneur le moins coûteux est l'adjudication au moins-disant comme elle est pratiquée dans beaucoup de pays : ceci peut se combiner avec les procédures préconisées ci-dessus afin d'obtenir la meilleure optimisation globale du projet et de l'exécution.

Le niveau de prix obtenu sera d'autant plus bas que le plus grand choix sera laissé aux Entrepreneurs pour les travaux provisoires, les méthodes d'exécution, éventuellement la maîtrise de la rivière pendant les travaux, et même le programme d'exécution. Les spécifications doivent être limitées à ce qui est réellement nécessaire à la qualité et à la sécurité des ouvrages et à la sécurité du personnel pendant les travaux.

Un autre élément essentiel est le choix d'une Supervision expérimentée et efficace, disposant des pouvoirs nécessaires pour des décisions rapides sur le chantier.

## 9.3. CONCLUSION

Le risque de rupture des barrages a été divisé par vingt depuis le début du siècle; la CIGB y a fortement contribué.

Tout en poursuivant ces progrès en matière de sécurité, la CIGB pourrait jouer un rôle essentiel dans la réduction du coût des barrages en mettant en évidence dans les Bulletins et les rapports aux Congrès l'importance de l'aspect économique et en montrant qu' « il est souvent possible de dépenser moins et mieux ».

Such comparisons are more difficult with dams. Unit costs vary widely at different sites and with different design alternatives and cannot be accurately estimated without a detailed analytical study : *thus the choice is usually made without adequate comparison of feasible alternatives*. This may produce a tendency to repeat past designs and pass over more economical alternatives, especially when they incorporate new shapes, layouts or combinations.

There are a number of approaches which might overcome this difficulty :

— Put more than one alternative out for tender (designed by one or more consulting engineers).

— In certain cases and under certain conditions, accept alternatives for temporary works and all or part of the permanent works designed by contractors.

— Call for turnkey (design and construction) tenders after the hydrological and geological surveys have been completed.

These approaches, which are in use with some dam owners, are slightly more costly on initial design studies but may lead to very substantial savings on total cost and promote the evolution of all dams towards greater economy.

## 9.2. CONSTRUCTION

Despite certain disadvantages, the best solution for selecting the least costly contractor still remains competitive tendering (lowest bidder being awarded) as practised in many countries. It might be combined with the approaches recommended above for a better optimisation of the total project and construction cost.

Price levels will be lower if contractors are left substantially free to choose their own temporary works, construction methods, perhaps river control arrangements during construction, and even the construction programme itself. Specifications must be confined to what is really necessary to ensure the desired standard of workmanship and safety in the structures, and accident prevention for the workforce.

Another essential item is the appointment of an experienced and efficient works supervision organisation with the necessary powers for rapid decision-making on site.

## 9.3. CONCLUSION

The dam failure risk has fallen by a factor of twenty since the turn of the century. ICOLD has substantially contributed to this trend.

While retaining its commitment to safety enhancement, ICOLD could also play an essential part in reducing costs by stressing the importance of cost aspects in its Bulletins and Congress Proceedings, with the message that “ it is often possible to spend less better ”.



---

## ANNEXES - APPENDICES

---

RAPPORTS INDIVIDUEL ET  
NATIONAUX

- A) P. LONDE
- B) ITALIE
- C) ÉTATS-UNIS
- D) ESPAGNE
- E) FRANCE

INDIVIDUAL AND NATIONAL  
REPORTS

- A) P. LONDE
- B) ITALY
- C) USA
- D) SPAIN
- E) FRANCE



## RÉFLEXIONS SUR LA SÉCURITÉ DES BARRAGES

Rapport présenté par P. LONDE, Président Honoraire de la CIGB

Il est faux de croire, et malheureusement certains le croient encore, que pour assurer la sécurité d'un barrage il suffit de suivre scrupuleusement les règlements, les normes, les standards et autres codes qui ont été publiés dans de grands pays industrialisés et qui sont imposés partout.

En réalité, on constate que presque toutes les catastrophes se sont produites sur des ouvrages réglementairement acceptables.

Les barrages sont intimement dépendants de leur fondation, et s'ils sont en remblai ils sont au surplus faits d'un matériau naturel. C'est dire que les problèmes géotechniques dominent. Or tout problème géotechnique a des données qui ont les propriétés suivantes :

- (a) caractère dispersé, et incertain, dans l'espace des caractéristiques des sols et des roches,
- (b) imperfection des mesures : nombre forcément limité et erreurs instrumentales,
- (c) caractère dispersé et incertain des sollicitations dans le temps,
- (d) imperfection du modèle mécanique,
- (e) grand nombre de paramètres.

Cet ensemble fait que l'ingénieur doit résoudre des problèmes complexes dont les données sont incertaines, et il ne peut les traiter que par des approximations elles-mêmes incertaines.

La démarche traditionnelle, et qui est encore imposée par la quasi-totalité des règlements, est déterministe, chacun des paramètres prenant une valeur déterminée, et les incertitudes et les approximations étant compensées sur un coefficient de sécurité. La marge, "mesurée" par le coefficient de sécurité, entre l'état limite qu'il suffirait de réaliser s'il n'y avait aucune incertitude et l'état réel le plus probable, est censée absorber sans dommage les erreurs faites sur l'appréciation

des actions et des résistances ainsi que sur le modèle mécanique.

La valeur numérique acceptable du coefficient de sécurité résulte de constatations empiriques. D'après le comportement de nombreux ouvrages, on admet, par exemple, qu'un barrage en terre, calculé par les modèles courants à l'équilibre limite, est sûr avec un coefficient de sécurité  $FS = 1,50$ . Cette valeur a même été réglementée dans certains textes qui font autorité de par le monde, et qui laissent croire qu'un tel coefficient assure totalement la sécurité. Cette démarche est dangereuse. Elle masque deux réalités, dont fort heureusement les ingénieurs sont de plus en plus conscients. La première est que selon le degré d'incertitude des données (valeur de la dispersion, nombre d'essais, qualité des mesures etc.) à un même coefficient de sécurité correspondent des sécurités réelles très différentes. La seconde est que la véritable sécurité du barrage, c'est-à-dire son potentiel de résistance aux actions destructrices, n'est pas réduit à un seul modèle mécanique de défaillance. Les statistiques ont montré par exemple que seulement 15% des ruptures de barrages en terre étaient attribuables à des mécanismes justiciables du calcul d'un coefficient de sécurité, toutes les autres résultant de mécanismes non "calculables" (érosion interne, submersion, etc).

C'est pourquoi on assiste aujourd'hui à un vaste mouvement d'idées qui cherche à repenser la notion de sécurité. En réalité, la sécurité ne peut être correctement définie qu'en termes de probabilité de ruine. Lorsque cette probabilité est faible la sécurité est plus grande que lorsque la probabilité est forte. Et cette notion vague est très féconde car elle prend en compte nécessairement les incertitudes qui affectent les données.

De même, dès qu'on raisonne en probabilités, on est conduit à tenir compte objectivement des conséquences d'une éventuelle rupture. On acceptera des probabilités de ruine plus grandes si les dommages potentiels sont moindres.

Malheureusement une nouvelle difficulté majeure survient: quelles sont les probabilités acceptables dans chaque cas, à supposer qu'on sache les calculer à partir des incertitudes affectant les données ?

On ne sait pas répondre à cette question d'une manière entièrement satisfaisante.

Il est un domaine toutefois où les ingénieurs raisonnent en terme de probabilité depuis longtemps. C'est celui des risques induits par les crues. L'observation hydrologique permet en effet d'évaluer les débits de pointe et les volumes des crues en fonction de leur période de récurrence, et l'on dimensionne les ouvrages d'évacuation pour passer la crue de la probabilité qu'on juge raisonnable en fonction des dommages potentiels que son dépassement provoquerait. Ainsi il est d'usage que pour un barrage en béton on dimensionne les

évacuateurs pour la crue de 5000 ans ou de 10000 ans, alors que pour un barrage en terre on est plus exigeant et on adopte des périodes de récurrence nettement plus grandes, telles celles correspondant à la notion de "crue maximale possible" (PMF en anglais) dont la période de récurrence, par définition, est pratiquement infinie. A l'inverse, pour les ouvrages provisoires on se contentera de 50 ans ou au plus 200 ans. Il faut dire que la crue de 10000 ans adoptée pour un ouvrage devant durer 100 ans correspond à une probabilité annuelle de  $10^{-4} \times 10^2 = 10^{-2}$ , égale à celle de la crue de 100 ans pour un batardeau provisoire exposé pendant un an seulement.

Une autre observation utile concerne les statistiques mondiales d'accidents de barrages. Aujourd'hui on compte environ une rupture pour  $10^4$  barrages/an, c'est-à-dire qu'un barrage donné a une probabilité de ruine a priori de  $10^{-2}$  s'il doit durer 100 ans. C'est une probabilité élevée que les progrès techniques doivent, par tous les moyens, s'efforcer de réduire beaucoup.

Il est certain qu'une telle constatation ne peut trouver de correctif par la démarche déterministe traditionnelle : quels coefficients de sécurité permettraient, par exemple, de diviser la probabilité de ruine de 10 ? Nul ne le sait.

Mais il faut reconnaître que la démarche probabiliste, beaucoup plus satisfaisante, se heurte à une grande difficulté. Dès que les paramètres du calcul sont nombreux, et c'est toujours le cas dans les problèmes géotechniques, le calcul numérique devient si complexe et contient tant d'hypothèses douteuses que les résultats n'ont plus de sens. C'est pourquoi les calculs probabilistes n'ont pas connu le succès qu'on escomptait.

Il y a heureusement une issue à cette situation. Elle consiste à adopter le raisonnement probabiliste comme guide de pensée, sans le conduire jusqu'au bout des calculs numériques et de remplacer ceux-ci par une analyse paramétrique. En effet la méthode probabiliste a le grand mérite, dans les problèmes où de nombreux paramètres sont présents et où les valeurs de certains sont difficiles à connaître ou à prévoir, de déterminer ceux, en nombre limité, qui sont les plus importants. On aborde ainsi la notion capitale pour la sécurité de l'ouvrage du "poids des paramètres". Et par un retour en arrière, on peut affecter à chacun des "paramètres lourds" un coefficient de sécurité partiel, l'analyse paramétrique permettant alors de jauger l'effet des coefficients partiels sur la probabilité de ruine.

Cette méthode maintenant éprouvée dans la solution des problèmes complexes de mécanique des roches, est généralisable à presque toutes les catégories de problèmes touchant la sécurité des barrages. Elle est très éloignée de la démarche déterministe traditionnelle. Elle peut paraître aux yeux de certains comme une approximation trop grossière de la sécurité, alors qu'en réalité elle n'est pas plus grossière

mais en fait plus rigoureuse que la méthode qui donne une estimation d'apparence précise de la sécurité par un coefficient unique (avec plusieurs décimales !) qui masque dangereusement toutes les incertitudes affectant les données.

Par cette analyse paramétrique on aboutit à des projets soit plus sûrs, soit plus économiques. En particulier, on peut mieux s'adapter aux conditions réelles de chaque ouvrage et accepter des risques calculés conduisant, par exemple, à tolérer des zones d'ouvrage ou de fondation moins soigneusement traitées que le reste parce que leur "poids" sur la sécurité est faible. On peut concentrer les efforts onéreux nécessaires à l'obtention de caractéristiques élevées dans les zones où celles-ci sont réellement utiles.

De la sorte, et avec une sécurité finale accrue et dosée selon l'objet, tous les intervenants dans la construction d'un barrage doivent trouver leur compte : le Maître d'Ouvrage, l'Ingénieur et l'Entrepreneur. On peut penser que cette démarche sera génératrice d'innovation dans la conception des ouvrages, dans leur exécution et dans les méthodes de contrôle des travaux.

## CONSIDERATIONS ON SOME ADDITIONAL CHARGES ON THE COST OF DAMS

**Report presented by the Italian National Committee**

prepared by Aldo MARCELLO

Reflecting on the possibility of reducing the costs and the time required to build dams, it occurred to me almost naturally to change the orientation of considerations from a purely technical sector to an administrative-bureaucratic one.

On the basis of experiences from the latest constructions (both in Italy and abroad) I can honestly say that in most situations charges induced by administrative-bureaucratic factors have always proved more burdensome than those due to an excess of design or constructional precautions, even though a simplification in this sense is surely desirable.

A first consideration is relative to the risk, to the definition of the residual risk and to the cost of its reduction.

The realization of a project, in any human sector, is an operation that involves a risk, evident or hidden, immediate or remote. The sector in which the project is concerned exerts a determinant influence on the quality or on the entity of the risk. In the specific sector of dams the risk factor is of supreme importance since it involves many human lives.

As I see the problem, the development and carrying out of a project can be seen from the enclosed diagram.

It shows how in the area of the less "refined" constructions some small increases in the energy expended correspond to great improvements in the qualities of the project (for instance A-B); on the other hand, coming closer to the IDEAL SOLUTION, modest improvements demand huge expenditure of energy (for instance C-D).

In place of a simple curve I have indicated a zone, since the solution adopted (represented by an ordinate, for instance E-F), can demand expenditure of energy ("costs" in an extended sense) different according to the abilities of the parties involved : Owner, Designer, Constructor, etc.

The distance between the "project solution" and the "ideal solution" represents the "residual risk" of realization and this is completely or partly unknown. The unknown aspect

is due to the limits or defects of the operations carried out during the different stages of the realization, as well as to the state-of-art at the moment of the realization of the project.

Nowadays, in the asymptotic sector of the diagram, the activities relating to the reduction of the risk involve very high charges; the unknown factors on the residual risk make, however, the result uncertain.

Furthermore, today some "new" risks have to be considered in addition to those relating to static security; first of all the environmental risk, the economic incidence of which can be quite high and also difficult to estimate, since it can rise during the development of the project under the push, frequently emotional, of local bodies and of Organizations that propose themselves as protectors of environment and ecology.

Applying these remarks to the operative reality of dams and reservoirs, it can be considered how all those who intervene in the different stages of development and execution of the project, are obviously and rightly inclined to reduce the residual risk. Unfortunately it often happens that these interventions come about in successive and not coordinated stages resulting in a number of decisions, all orientated towards caution, their certain effect being the increase of costs, not always that of a real improvement of safety.

Furthermore, since the majority of the Owners operate in the public sphere, the proposals aiming at a risk reduction, too frequently find acritical assents; in fact the dilution of responsibilities, the result of the quantity and of the cumbersomeness of bureaucratic rules, means nearly always that an official more open to the adoption of variants is found, without taking into consideration any technical-economic evaluation.

Also outside the "risk" subject, one can find indirect causes of the increase in realization costs : among these, the most frequently occurring ones arise from the complexity of the procedures to obtain approval, financing and submission of the works. This complexity frequently entails a lengthening of time so important that no more perfectly up-to-date projects are accepted, involving variations in the project during the realization brought about by valid reasons or by vested interests.

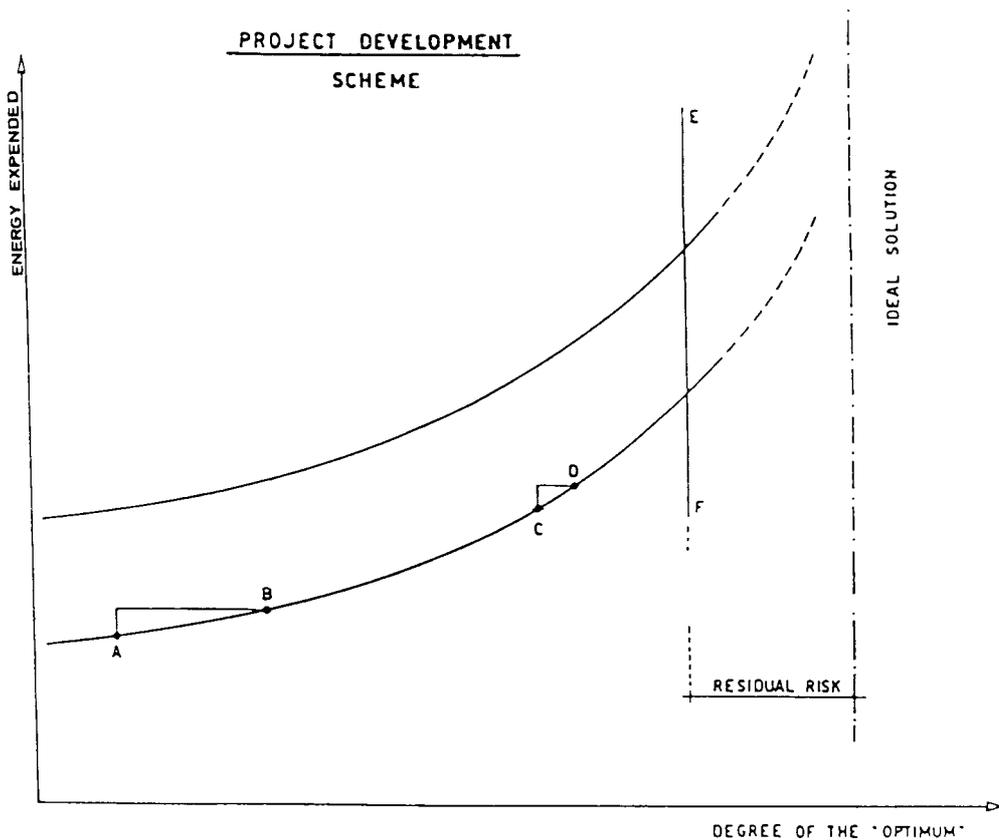
Furthermore, the financing body of the works does not always coincide with the Owner as to the liquid assets which the financing of the design is usually tied to; consequently it often occurs that the funds assigned to the designer for investigations and research are given begrudgingly so that they cannot be carried out in a satisfactory way.

This practice opens the way to corrections and variations that, when carried out during the works, will increase the

costs and time of realization more considerably than if they had been done in good time.

I think that these are some of the causes of additional charges in the realization of dams and their incidence on the general cost of the realization is considerable, especially because their control is difficult as is their limitation as regards the technical bodies entrusted with the realization of the dam.

I think, therefore, that a commission attending to the whole project, to act as mediators between technical bodies and bureaucratic-administrative institutions (a commission officially entrusted with an established authority, indispensable for the most rapid and qualified carrying out of its functions) can constitute the most simple and effective instrument able to reduce and even cancel the "risks" of important and often unjustified economic burden.





## COMMENTS ON SAVINGS IN DAM CONSTRUCTION

### Report presented by the US National Committee

#### GENERAL

The cost of dams in the United States, as measured by the USBR Index for Dams, has been fairly flat since 1982, while the Consumers Price Index has increased at an annual rate of approximately 4 percent. See Fig. 1.

Between 1979 and 1982, the increases in the USBR Index for Earth Dams approximately parallel the CPI while the USBR Index for Concrete Dams increased at a slightly greater rate.

The leveling off of costs since 1982 was due to a general recession in the US construction industry, especially in the construction of dams. This recession has greatly increased the competition among Contractors for bidding on dam projects with resulting lower costs.

The dam construction industry is a mature industry and there have not recently been any major developments in technology or systems which are likely to result in any large cost reductions. One exception might be roller compacted concrete which will be discussed later.

The benefits from improved mechanization of earth moving equipment and concrete handling and placement equipment in previous decades has already been factored into costs and further major improvements are unlikely.

Economies of scale which result in decreased costs in other industries are not valid in the dam construction industry except for a few very large projects.

At the same time that increased mechanization and improved systems and technology were improving productivity, several major dam failures occurred, - Vaiont, Teton, etc. These failures, with associated loss of life and property damage, pointed out to us in the industry and to the general public, the risks and liability involved in large dam construction. This has resulted in increased conservatism and resulting increased costs for dam construction. For a private company, in particular, involved in dam design or construction, loss of a major dam would most probably destroy the company.

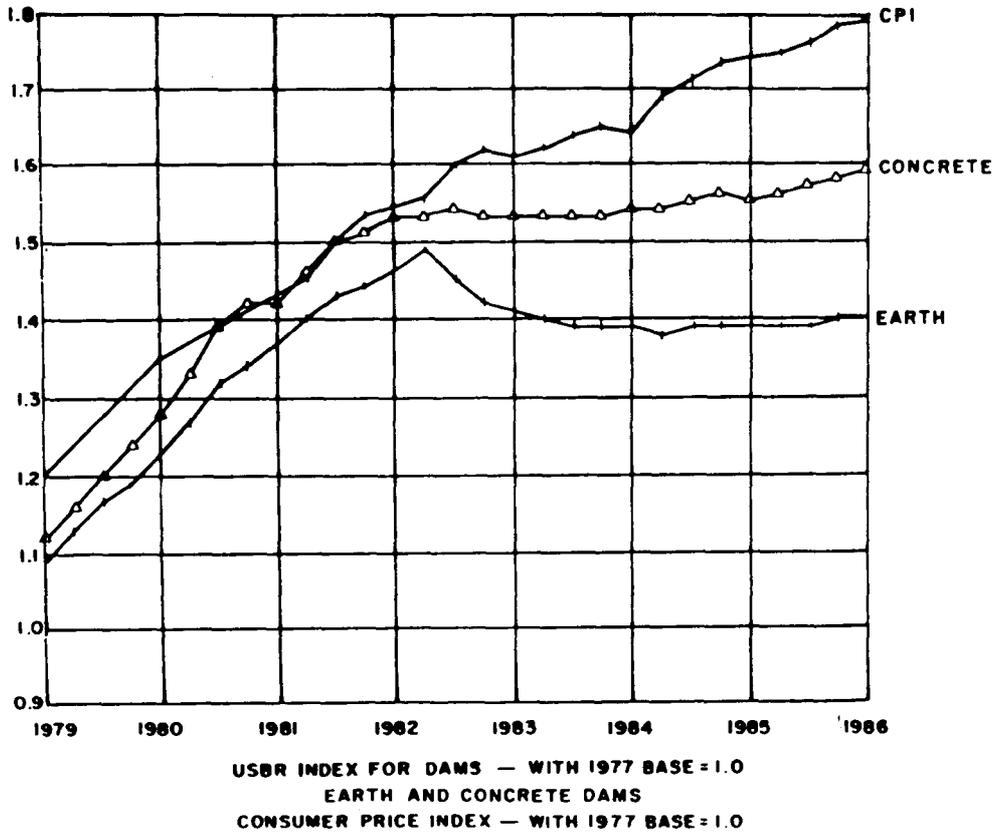


FIGURE 1

In spite of the foregoing discussion, there are many areas where refinements could be made in general design, specifications and construction supervision which could result in significant savings on individual projects.

#### ASSESSMENT OF COSTS

Most dam projects are unique unless you happen to be dealing with a number of projects on the same river and of the same design such as the run of the river dams and locks on the Columbia and Snake Rivers or the Mississippi River System. Even then designs and foundation conditions vary enough that comparison presents a real problem. Labor costs in the United States vary significantly with geographic areas and certainly could not be compared with labor costs in developing countries.

It is doubtful that meaningful data can be developed for any use other than a general indication of cost trends.

This could be done for hydroelectric projects on a cost per installed kilowatt basis.

The US Bureau of Reclamation periodically publishes their Construction Cost Trends which contains data on construction costs for the area in which they operate - Western United States. Additionally, the USBR has developed a cost index for a hypothetical project consisting of a concrete dam, earth dam, powerplant and transmission system, canals, laterals and drains.

This index is compared with these other indexes :

- Federal Highway Administration.
- Engineering News-Record Construction Cost Index.
- Construction Machinery and Equipment.
- Petroleum Products.
- Consumer Price Index.

The trends exhibited by the USBR Index, the Engineering News-Record Index, the Construction Machinery and Equipment Index and the CPI are very similar for the years 1970 through 1978. From 1979 to 1986, the USBR Indexes and the CPI are compared in Fig. 1. The Petroleum Products Index and the Federal Highway Administration Composite Index exhibit quite variable behavior compared with the CPI but the trends are generally up.

Examination of these data indicate that dam construction has not increased faster than general inflation and, in fact, during the last four years has been flat or exhibited little increase.

#### GENERAL DESIGN, SPECIFICATIONS AND SUPERVISION OF CONSTRUCTION

Early on in any project, there are several basic decisions made which greatly affect the total cost of the project. There are :

1. Degree of design conservatism to be used.
2. Conceptual design including comparison of alternatives
3. Type of Construction Contract.
  - . Unit Price
  - . Lump Sum
  - . Cost Plus
  - . Target Estimate
  - . Fast Tracking

Unfortunately, there are usually one or more constraints imposed on an organization which inhibit the full

consideration of all the alternatives available to the industry. A governmental organization is restricted by its Charter and Public Law with regard to contracting alternatives. A private organization is limited by the experience of its staff and in bred methods of doing business.

A portion of this problem is alleviated on some projects and by some organizations through the use of an independent board of consultants composed of individuals with broad professional experience in specific disciplines. These individuals, properly used, can insure that adequate consideration and analysis is given to the major planning and design factors which will lead to a cost effective project.

Another concept, occasionally used in the past, which could be used effectively on large projects is design competition. An owner would engage two engineering firms of equal competence paying each a specified lump sum, to develop independent basic conceptual designs. Assuming that the designs do not turn out identical, the savings between the projects should more than pay for the work performed by the second firm. A governmental organization could do the same thing by engaging a single firm to perform the services to be compared with the organization's alternative.

In addition to this primary cost control, there are a host of secondary items, (design details, specifications and construction supervision) which affect cost. The effect of these secondary items on cost is primarily controlled by individual competence and experience. In the international arena, it is controlled to some extent by national and/or regional philosophies of design and construction methods.

A discussion of some of the pertinent details follow :

#### DESIGN - SPECIFICATIONS

##### 1. River diversion

US practice has historically been to place the responsibility for river diversion design and execution on the Contractor. The reasons for this are that the Contractors are more experienced than the Engineers in this activity and that there is a great amount of risk involved. It is commonly bid as a lump sum item. In actual practice, the Engineer must study alternative diversion schemes during design to assure himself that the design is constructable and economical. The Engineer, especially on complicated projects, will spend more time and money on this study than will most Contractors. If the Engineer-Owner would design the diversion scheme, accept responsibility for its technical adequacy, purchase insurance for the risks and make the Contractor solely responsible for proper execution, then the Contractor's assessed cost of risk would be saved.

## 2. Rollcrete

This has or had the possibility of considerable savings on many projects. The danger now is that the development of the specifications could easily ruin its cost effectiveness.

## 3. Produce a practical design - (constructable)

. Riprap - Should be sized based on consideration of natural joint patterns and production blasting techniques. Test blasts would be useful for designing riprap and bedding.

. Filters - Consideration should be given to cost of processing and waste as well as having sufficient width for economical placement.

. Borrow Areas - Access from borrow areas is often overlooked by the designer - frequently creating additional cost.

. Shot Rock Gradings - The number of grading sizes should be kept to a minimum. Separating rock to meet many specifications is very expensive. The rock will break according to existing joint patterns. If one size requirement is off the natural breakage, the waste generated can be intolerable.

. Concrete Mix Designs - Study the cost relationship between cement and gradation to produce a mix design which utilizes the natural materials reducing processing waste.

. Lift Heights - Use maximum lift height practical and standardize lift heights to permit maximum reuse of forms.

. Form Cleanup - Why require form cleanup for contraction joints or surfaces buried by fill or under reservoir level ?

. Tolerances - Give maximum tolerance possible in non-hydraulic areas.

. Galleries - Match gallery height to a multiple of lift height. Do not specify odd shapes - rectangular is ideal. Allow precast elements in lieu of forms. Tolerances and finishing requirements can be relaxed in galleries.

. Vertical Contraction Joints - Do not need cleanup.

. Gate Guide Blockouts - Use maximum practical size.

. Underground Construction - Keep all tunnels either horizontal or vertical. Vertical shafts can be enlarged slightly to compensate for head loss.

. Schedules - Should be as fast as practical in order to reduce interest costs.

#### 4. Contracting Provisions

The traditional method of contracting dam construction has been by Unit Price or combination Unit Price - Lump Sum contracts with public bidding. Prequalification of Contractors is often used to eliminate unqualified bidders. This type of bidding is often dictated by law in many countries of the world. These types of contracts have certain advantages to the Owner :

. Theoretically, the lowest price is obtained for the work because of the open public bidding.

. The Contractor is responsible for productivity of labor

. Opportunities for collusion between Owner's representatives and Contractor's is minimized.

. Contractors have an incentive to use their ingenuity and take calculated risks to produce a low bid.

Some disadvantages include :

. The design must be essentially complete before bidding. This adds significant time to the Project schedule with resulting interest and lost revenue costs.

. Changes in the Project after awarding the contract often result in expensive claims to be settled by negotiation and/or litigation. In addition to the cost of settling these claims, the time and energies of key Project personnel are diverted from the objective of getting the Project constructed and in operation.

. The most competent Contractor and/or the Contractor which would produce the lowest cost satisfactory Project is not necessarily the lowest bidder.

Consideration should be given to Target Estimate and Fast Track types of Contracts.

The Target Estimate contract has these advantages :

. Selection of one or more highly competent Contractors for negotiation of the Contract.

. The Contractor is protected from loss by the Owner's assumption of many of the risks involved in dam construction. The Owner can insure against some of those risks, others the Owner is paying for in any case by increased bid prices and claim settlements.

. The Contractor can be made responsible for productivity of labor.

. The Contractor has an incentive to produce a lower cost Project by participating in savings to the Owner if the cost

comes in under target.

. The design does not have to be as complete as for a hard money contract and changes are more easily negotiated by adjusting the target.

. A Target Estimate type of contract can usually be negotiated in much less time than the public bidding procedures takes.

In certain cases, consideration should be given to a negotiated Fast-Track contract with the Owner-Engineer-Contractor working as a team. A good portion of the design and public bidding time can be saved. Selection of the team members and establishment of incentives to keep costs under control need very careful consideration.

#### INSPECTION - QUALITY CONTROL

This is a difficult subject to address. On a particular project bid on a Unit Price or Lump Sum basis, there is no question that inexperienced and/or over zealous inspection increase a Contractor's costs. This may or may not increase Project cost. It may only reduce the Contractor's margin. The long term effect, however, is to increase cost on future projects.

On Target Estimate and Fast-Track type contracts, the efficiency and experience of the inspection has an immediate effect on cost to the Owner and profit to the Contractor.

The dam inspection industry in the United States presently appears to be on a trend toward the type of mentality of inspection which was partially responsible for the collapse of the nuclear construction industry.

Many judgements have to be made daily by any inspector involved in dam construction and rigid adherence to specification or procedures without application of the judgement factor will soon increase construction costs in our industry to the point where many projects will be priced out of the market.

We need to aggressively educate and promote the concept that dam building is not an exact science and inspection of this type of construction involves many judgements on a daily basis which can be made only by experienced, well-trained individuals. It is impossible to anticipate the infinite number of situations which can arise in dam construction and devise a procedure for each one.

On every job, the attitude needs to be developed that the Inspectors-Contractors are a team working to produce a satisfactory product for the Owner without cost penalization to the Contractor.



## COMMENTS ON SAVINGS IN DAM CONSTRUCTION

### Report presented by the Spanish National Committee

#### 1. GENERAL

There are three different stages in the life of a dam, although these are intimately interrelated : design, construction and operation. Each of these three phases requires work that involves a cost. These costs have an influence on each other, so that if we call D the design cost, C the construction cost and O the operating cost, an increase in D, provided that it is well orientated and within certain limits, will lead to a reduction in C, allowing O to remain constant or to fall. Similarly, a reduction of D below a limit, generally results in an increase in C.

If C is reduced, always under certain limits, for the same value of D, O will grow, as maintenance expenses and repairs will become more important.

Starting from the basis that dam safety must always be guaranteed, the trend must be to minimize the sum of  $D + C + O$ , introducing the corrections into each one (D, C or O) that correspond to the time (investment O is considerably after D and C).

On estimating the value of O, the loss involved on not being able to properly operate the dam during the repair period must be considered (e.g. the loss of power generation involved in having to lower the reservoir for face repairs or a supplementary grouting operation).

Below we comment on some factors that have an influence on dam cost.

#### 2. GOVERNMENTAL AUTHORIZATIONS AND PROCEDURES

In this section we refer to the influence that Spanish and other similar legislations may have on dam cost because of the Governmental authorizations and procedures involved.

- On starting to consider the need to build a dam for a specific purpose, money starts to be spent.

At the same time a procedure commences with the Government that includes a series of authorizations and approvals of studies, designs, etc. by different Public Organizations. What usually happens is that, as the different official Organizations are not properly coordinated, delays usually occur that are nearly always unjustified, that make the period of time between the start of application for authorization and commencement of the works excessively long. This means that the investments being made in surveys, studies, designs, guarantees which are preceptive to be deposited, etc., are frozen for a much longer period of time than desirable, with the consequent increase in cost due to capitalised interest charges.

- The non-existence or non-application in practice of an adequate Expropriations Law means that the purchase of land is laborious and frequently subject to speculation.

Many cases are known where it has been necessary to halt the works in the middle of construction, or it has not been possible to fill the reservoir after completing the dam for several years, due to problems arising in the purchase of land and, in general, due to the slowness of the expropriatory processes.

- As the land that has to be occupied is always shown in the first concession or feasibility study, the corresponding Organization in the Government should request the applicant for the authorization, from the start of the authorization procedure, to supply the necessary studies to be able to establish fair prices or the constructions substituting those affected.

- Another factor that must be taken into account and included in the design subject to authorization is the replacement of communications and services. Cases exist of delays in commencement of normal reservoir operation as these problems have not been solved prior to dam completion.

- During the construction period, the State Government Organizations with a responsibility for supervision and monitoring of construction, must have the necessary agility to avoid stoppages or delays due to performance of the inspection itself or due to approval of design modifications.

- In dam works performed both by the Government itself and by private companies, the provision of funds and authorization of expenses must be made sufficiently beforehand to ensure that stoppages or delays do not occur.

### 3. DESIGN

- Geological investigations must be as complete as possible in order to obtain knowledge on site geology with maximum precision. The investigations must be directed by experts with intensive experience, as an excessive number of bore holes or inspection galleries without a sound preliminary study indica-

ting where these should be located may be a useless expense.

- In complicated geological structures, prior to contracting the works and in order to complete the design, preexcavation of the weathered part is advisable to clarify doubts on foundations.

- These investigations must cover the available materials. It is essential to have information on materials to be used and their real characteristics. Unscheduled dam cost increases have occurred on having to change quarries for a concrete dam, or having to waste material in an embankment dam when the design requires characteristics exceeding the averages of the deposits employed or due to insufficient investigation of the deposits.

- Design requirements must be based on real data and not on purely theoretical data or data taken from limited investigations. The specifications required of concrete aggregates or earth or rockfill, must be in accordance with those of existing materials.

- Material durability must be analyzed to reduce operating costs.

In concrete dams, it is essential to study potential aggregate reactivity with alkalis, calcium hydroxide, etc. In some cases, repairs necessary after some 10 to 20 years of dam life have involved very high costs that would have justified the selection of other quarries or even another type of dam.

- The design must consider local weather conditions at the site.

The design of a rockfill dam with a central clay core in a rainy area made it necessary to totally stop dam construction in the rainy seasons (6 or 7 months) every year, because the clay water content made compaction impossible.

- The analysis of alternative solutions must be as complete and objective as possible and be carried out when sufficient knowledge has been obtained on the site. It must be taken into account that the most economical alternative is not always the one resulting from minimising the multiplication of volume by a more or less conventional unit price.

- Sometimes a certain type of dam has become fashionable and, on comparing solutions, there has been a trend for this type of dam to be the most advantageous (on paper anything goes). When comparing solutions, we must, therefore, forget about fashions.

- The design must be as complete as possible in order for major modifications and unforeseen factors not to occur and to enable the construction company to plan and evaluate the works properly. This avoids extensions to the construction period, with a consequent increase in capitalised interest and delays

to profits receivable on the dam entering into operation. In the present situation, in which money is expensive, completion date delays may have a great influence on overall dam cost.

- Construction methods must be considered in the design. For this, it is advisable for designers to request the opinion of experienced construction companies, that may contribute valid solutions.

- In general and in the present situation, the high cost of skilled labour and highly processed materials (reinforcing steel, formwork, etc) grows faster than those of heavy machinery and the raw materials, in which the labour value added is lower. For this reason, the present trend is to design dams with larger volumes and highly mechanised construction methods, avoiding structures with complex shapes that require the use of labour that we could call "craftsmen".

- The specifications and conditions of contract must be suitable for the dam being designed. At any event, specifications of materials must be in accordance with the materials actually available.

- An excessively rigid specification is usually the result of a shallow study and occasionally leads to copies, that are unfortunately very frequent in the conditions of contract, such as : "The materials to be used in this part of the works shall be of the best quality available in the market".

- An attempt is frequently made to supplement a lack of knowledge on the foundation, resulting from limited geotechnical or geological studies, in the project specifications, with a consequent cost increase; e.g. requiring dentations in a gravity dam foundation when, on executing the excavations, it is found that the dam is well fixed in the foundation due to the unscheduled excavation depth, guaranteeing by itself stability against sliding; or the requirement for executing concrete dam excavations in successive stages, in order to survey the foundation.

- In summary, expenses must not be spared in the design of a dam and all related studies, such as geological surveys, hydrological studies, etc. Information as complete as possible about the site must be obtained, analyzing possible solutions, investigating materials and being realistic about dam conception. It must not be forgotten that errors are removed with a rubber when on paper and with money during construction.

#### 4. CONSTRUCTION

In general, occasional exceptions apart, construction methods must tend to maximum mechanization of the works, avoiding "craft work" wherever possible. Undoubtedly, these construction methods must be analyzed at the design stage and dams must not be designed without knowing how they are to be built.

Collaboration between designers and construction companies at the design stage is fundamental.

It must also be considered that coincidental interests may make a construction system more economic than it was at first thought; e.g. the existence of plant from previous works and already depreciated (cableways, aggregate classifying and crushing installations, etc.) or materials from other works near the site (mine waste, etc.).

Some specific points are made below, suggested by various members of the Spanish Dam Construction Technology Subcommittee, which in many cases may contribute major savings during the construction stage.

- In-depth knowledge is necessary of river flow to properly design provisional diversion structures. In some cases, diversion tunnel rock quality has been overvalued, leading to cave-ins. In this way, the fictitious saving of eliminating the lining leads to a major additional cost.

- Economising on cofferdams, with the consequent loss of safety in the event of foreseeable floods, may cause major additional costs.

- Occasionally a lined canal may be more economic than a diversion tunnel.

- In many cases it may be more convenient to design a river diversion with a final utilization in the dam (sluiceways, cofferdam incorporated to the dam, etc.).

- Concrete manufacturing plant automation, involving computerization, with a record of the operations performed.

- The elimination of transverse contraction joints above a certain height.

- The piping and valve systems for an eventual second stage of joint grouting are usually damaged in the first stage and are therefore useless and uneconomic.

- Excessive precooling when manufacturing concrete in hot weather with flake ice is not advisable, as it may considerably reduce plant performance. A precooling time of around 15 seconds is generally sufficient.

- Traditional concrete strengths are usually much greater than necessary for the stresses to which they are subjected. Efforts must be orientated in this direction, as concrete cost (see Appendix) represents around 50% of overall dam cost.

- A concrete placement system, apart from rollcrete, which is giving good placement results, is this based on conveyors and distributors, both moved by tower cranes.

- The planning of loading, transport, placement and compaction operations with available machinery is fundamental for placing earth and rockfill on site. A proper pathway study is of great importance for this type of works.

- For dams with upstream facings, great care must be taken that the upstream slope adapts to the required geometry, so that there is no need to add or remove material on commencing the facing.

- In embankment dams, it is generally economical to avoid a major differentiation in the materials to be used (various types of drains and filters, etc.), even though larger volumes have to be employed.

- Excessive limits must not be placed on the finishes of concrete faces that do not have hydraulic conditioning factors. Finishing defects that do not involve a loss of surface concrete quality, which are sometimes not allowed for aesthetic reasons, cannot be appreciated at the distances from which dams are usually contemplated.

- It should not be forgotten that in engineering anything that is no functional is not aesthetic either.

- At all stages supervision of the works must be sufficiently intense to ensure that the specifications are fulfilled.

- An engineer and his staff with sufficient experience and knowledge of the design generally perform the supervision properly, without excesses that may impede proper progress of the works. Excessive supervision is usually the result of a team in charge with little experience and little knowledge of the design.

- It has been recommended in some cases to reduce grouting treatment as far as possible in order to carry out grouting only when necessary in the light of drainage behaviour after the initial filling of the dam. This usually reduces grouting treatment cost; nevertheless, it must be considered that if the dam has entered into commercial operation after the first filling, it is generally necessary to lower the reservoir level in order to carry out the second grouting stage, with the consequent economic losses (lower power generation in the case of a hydro power scheme, etc.).

## 5. CONTRACTING

A competitive bidding among qualified construction companies is the best procedure, within an economic system such as that of Western Europe, to force construction companies under a free competition system to place all of their knowledge and experience in the most suitable construction methods to reduce dam cost.

With a well-studied and defined design, the bidding based on unit prices among qualified construction companies is, in our opinion, the most adequate, provided that not only the budgets are analyzed, but also the construction methods and solutions adopted by the different construction companies, and that the contract is awarded taking all of these factors into account. The most economical contract does not necessarily coincide with the one having the lowest tender price. Some tender prices that are lower than others may involve construction methods with greater uncertainties that can result in major deviations and a higher final cost of the works.

In the event that the design is not sufficiently studied, any contracting system is bad. Nevertheless, in our opinion, the least bad is the target estimate contract. This system requires an extensive works supervision team with permanent auditing of the construction company's accounts. At any event, if real economy is required, what is to be done is to redefine the design and study it properly to avoid "surprises" during construction as far as it is possible.

## 6. CONCLUSION

Summarising the above, we consider that no expense should be spared during the design and this must be complete; economies can be made during construction, but always taking future operating costs into account.

Contracting should be by competitive bidding among properly qualified construction companies and the lowest priced tender should not decide the awarding of the contract.



## **LES BARRAGES MIXTES BÉTON-REMBLAI**

### **Rapport présenté par le Comité National Français**

préparé par F. LEMPÉRIÈRE et C. BESSIÈRE

#### SUMMARY

About 80% of the dams in the world are rockfill or earthfill, the choice being mainly governed by economic considerations.

The development of Roller Compacted Concrete during recent years, now often makes this the preferred solution when foundation conditions permit, since it allows overtopping of the dam body, a considerable decrease in the material volume, and a sensible shortening of the completion time.

Solutions using Roller Compacted Concrete and fill together could combine the advantages of both.

The report presents three examples of mixed RCC-fill hibryds :

The first is derived from the earthfill profile, but the core is realized in RCC (as already constructed for some cofferdams, e.g. for the KARUN Dam).

In the spillway area, the RCC provides stability of the profile without any filling downstream.

The safety of the dam can be increased by adopting an arched layout (Fig. 1).

The second solution is derived from Chinese experience (more than 100 dams on the ZHAOGUSHE model).

The dam itself is a rockfill structure with an inclined core or an upstream concrete facing. But the downstream part of the profile is replaced by an RCC retaining wall.

The disposition allows overtopping of the dam even with a high specific discharge (Fig. 2).

The third solution (Fig. 3) is derived from the concrete buttress dam. Its cost may be very attractive where labour cost is low, as the need of construction equipment is reduced.

The watertightness is procured by vertical reinforced concrete arches.

Stability is provided by RCC buttresses (or reinforced concrete for lower dams) weighted with fill.

The typical profile can also be made to support overtopping or an RCC gravity spillway can be added.

These three new dam types appear to be attractive from engineering and at economic points of view as they may :

- reduce RCC unit prices (better access during construction - no specified watertightness)
- reduce total RCC volume,
- permit use of RCC at sites where rock quality is not very good.

•  
• •

Près de 80% des barrages existants dans le monde sont des ouvrages en remblai (terre ou enrochement), le choix de ce type de solutions étant dû souvent à des raisons purement économiques.

Le développement, au cours des dernières années, de la technique du béton compacté au rouleau (BCR) conduit maintenant dans de nombreux cas, lorsque les conditions de fondation sont suffisantes, à préférer cette dernière solution aux remblais classiques, car le béton compacté permet :

- le déversement sur le corps du barrage,
- une réduction très notable du volume de matériaux à mettre en oeuvre (4 à 5 fois plus faible que pour un remblai classique),
- une réduction sensible des délais d'exécution.

Ceci fait que le bilan économique global est souvent favorable à la solution du type BCR, bien que le prix unitaire moyen des remblais de barrage soit beaucoup plus faible que celui du BCR.

Comme le coût moyen des barrages en remblai est très souvent fortement majoré par les précautions nécessaires pour assurer correctement leur étanchéité et leur protection contre les risques d'érosion (filtres - rip-rap ..), des solutions permettant de conjuguer à la fois l'utilisation des remblais "ordinaires", sans spécifications ni sujétions particulières, et le BCR devraient être attractives tant techniquement qu'économiquement.

Le but de ce rapport est de présenter certaines solutions de ce type qui ne sont probablement pas encore complètement

optimisées et restent susceptibles d'améliorations, mais paraissent présenter un intérêt économique (à sécurité égale) par rapport aux barrages "gravité" en BCR auxquels on peut les comparer.

Dans les réflexions qui ont conduit à ces solutions, les points essentiels ont été la recherche d'économies dans les solutions BCR grâce à :

- la réduction des quantités globales de BCR,
- la solution des problèmes d'étanchéité par des solutions simples et moins coûteuses que les deux méthodes souvent utilisées (masque amont - surdosage en liant et spécifications techniques contraignantes pour le BCR),
- la suppression de certains coffrages,
- des facilités d'accès pour la mise en oeuvre.

Les solutions proposées peuvent s'adapter à toute fondation acceptable pour un barrage en BCR, et même dans certains cas à des conditions plus médiocres. Elles présentent en général une grande marge en matière de sécurité.

Il est probablement possible de faire des économies sur l'importance des fouilles, le traitement des fondations, les dispositions de drainage, tout au moins pour les ouvrages de hauteur limitée.

## 1. PREMIER TYPE DE SOLUTIONS

(voir Fig. 1A - 1B - 1C).

Cette famille de solutions est inspirée du zonage des barrages en remblai :

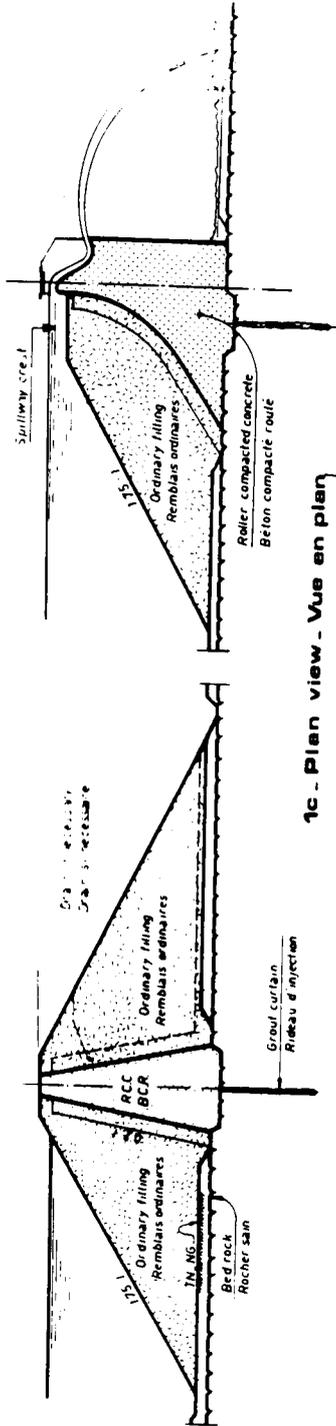
- la recharge amont est constituée de remblais ordinaires sans spécifications élevées, et intervient dans la stabilité générale par son poids,
- le noyau est constitué de BCR comme cela a déjà été réalisé sur certains ouvrages provisoires (par exemple le batardeau du barrage de KARUN),
- la recharge aval est également constituée de remblais ordinaires.

Entre la recharge amont et le noyau est interposée une couche de matériaux fins permettant d'améliorer l'étanchéité du noyau en BCR par colmatage des fissures éventuelles.

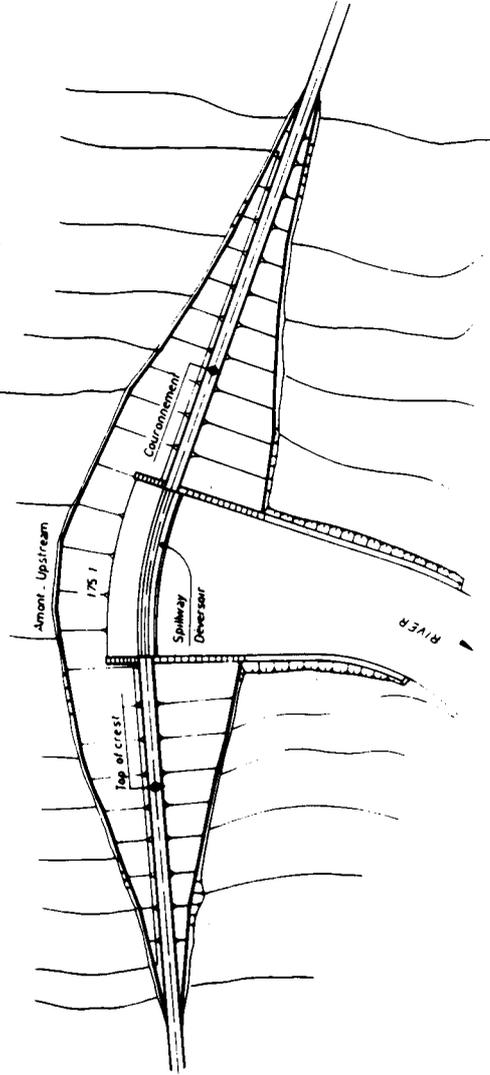
Entre le BCR et la recharge aval, si cela s'avère nécessaire, on peut interposer un drain, prolongé par un tapis drainant sous la recharge aval.

**Figure 1**

**1a - Non overtopped part - Zone non déversante**



**1c - Plan view - Vue en plan**



Dans les zones déversantes (Fig. 1B), la recharge aval est supprimée et la forme du noyau adaptée pour permettre le déversement libre, tout en évitant des risques d'érosion de la fondation trop près du barrage.

Comme pour un ouvrage gravité en BCR pur, le tracé en plan peut être incurvé de façon à bénéficier de la sécurité et/ou de l'économie complémentaire de l'effet voûte.

La zone déversante peut se situer dans la partie centrale, la recharge aval des zones sur berges étant retenue par un "mur de pied" en BCR servant également de guideaux latéraux à la zone déversante.

Les recharges et le BCR sont montés simultanément, ce qui évite tout coffrage dans les zones non déversantes et le coffrage amont ailleurs. De plus cette méthode facilite les accès à tout niveau du barrage pendant les travaux.

## 2. DEUXIEME TYPE DE SOLUTIONS

Plus d'une centaine d'ouvrages, dont certains dépassent 30 mètres de hauteur, ont été construits en Chine sur le modèle dit "ZHAOGUSHE".

Ils sont composés par un barrage terre-enrochement à noyau incliné, dont la recharge aval est remplacée par un mur de soutènement quasi vertical en maçonnerie peu ou pas cimentée. Ce mur supporte des déversements de quelques  $m^3/s/ml$ .

Il semble intéressant d'adapter ce principe à une combinaison enrochement-béton compacté.

Dans la solution envisagée (Fig. 2) :

. **l'étanchéité inclinée** peut être réalisée soit par un masque amont en béton armé ou autre comme présenté, soit par un noyau incliné,

. **le mur aval** est réalisé en béton compacté.

Ce type d'ouvrage nécessite une étanchéité correcte au raccord entre le masque et le mur aval.

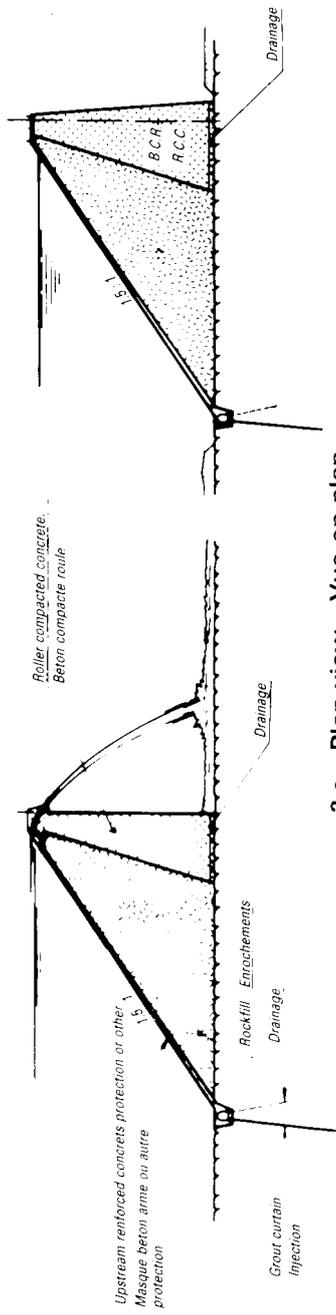
Des fuites éventuelles au droit de ce raccord, au contact avec la fondation ou à travers le masque, doivent pouvoir être reprises par le drainage du mur aval en toute sécurité.

Cette solution permet d'envisager la submersion du barrage en cas de crues exceptionnelles pendant la construction (jusqu'à mi-hauteur de l'ouvrage environ). Elle permet un déversement important au stade définitif.

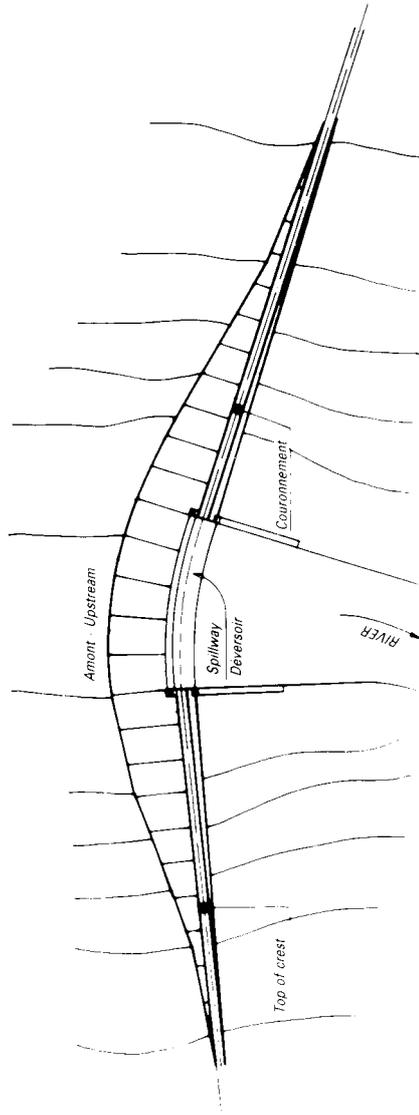
Comme pour les solutions du premier type, une courbure du tracé en plan de l'ordre de 100 mètres de rayon peut encore

**Figure 2**

**2 b - Spillway part - Zone déversante      2 a - Non overtopped part - Zone non déversante**



**2 c - Plan view - Vue en plan**



améliorer la sécurité ou l'économie, mais complique l'exécution du masque.

La courbure peut être limitée à la partie centrale déversante où le parement aval est vertical. Sur les rives (zones non déversantes) on peut donner un faible fruit vers l'aval au mur en BCR.

### 3. TROISIEME TYPE DE SOLUTIONS

Les barrages à contreforts sont maintenant rarement réalisés dans de nombreux pays à cause du coût élevé des coffrages inclinés et des échafaudages et de la main d'oeuvre qualifiée, nécessaires pour leur construction.

Il semble que l'association de barrages à contreforts avec des remblais à l'intérieur des cellules entre contreforts puisse être une solution économique surtout pour les pays à faible coût de main d'oeuvre : le remblai contribue en phase définitive par son poids à la stabilité d'ensemble de l'ouvrage.

Dans la solution proposée (Fig. 3) :

. **l'étanchéité amont** est constituée par des voûtes multiples en béton fortement armé. Ces voûtes travaillent en traction, pendant la construction ou à vide sous l'effet des poussées du remblai, mais ces dernières sont limitées par l'effet "silo" dû aux contreforts. Elles travaillent en compression quand la retenue est pleine.

En pied amont de l'ouvrage, on pourra interposer, pour faciliter le colmatage des fissures éventuelles pouvant se développer sous l'effet du mouvement d'ensemble vers l'aval, un remblai de matériaux fins avec un filtre.

. **les contreforts** assurent l'appui de ces voûtes et la stabilité d'ensemble.

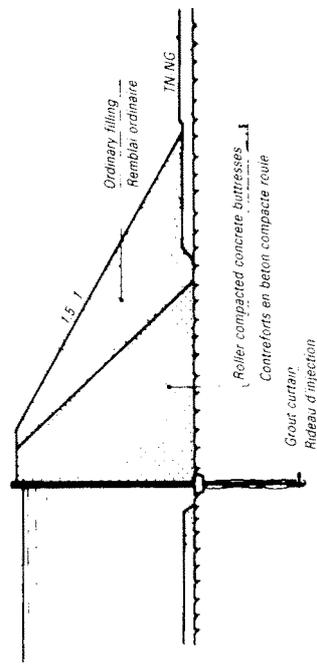
Pour des ouvrages de hauteur relativement importante (plus de 25 à 30 mètres) il est probablement plus économique de prévoir des contreforts épais (4 mètres environ) en béton compacté espacés de 15 mètres environ entre axes.

Dans ce cas, les contreforts peuvent être réalisés en même temps que le remblai, les voûtes étant elles montées quelques semaines en avance.

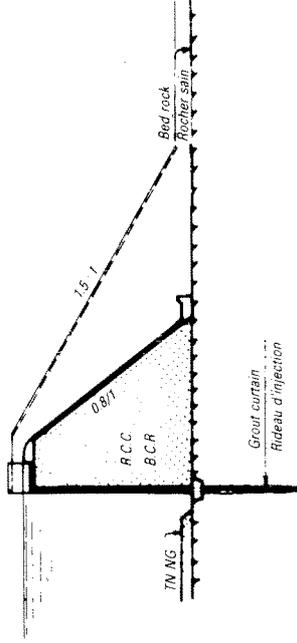
Pour les ouvrages de hauteur limitée, les contreforts peuvent être minces et réalisés en béton armé, leur entre-axe étant alors réduit à 12 mètres environ. L'ensemble de la structure en béton (voûtes + contreforts) est alors construit avant remblaiement.

. **le remblai** n'agit que par son poids en "lestant" les contreforts.

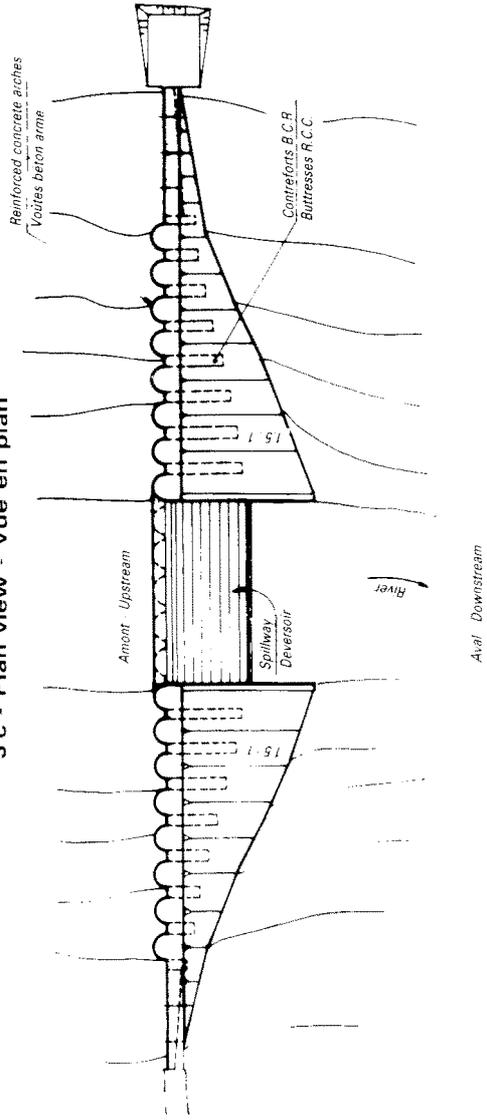
3 a - Non overtopped part - Zone non déversante



3 b - Spillway part - Zone déversante



3 c - Plan view - Vue en plan



Il n'est donc pas nécessaire de fixer des spécifications poussées qui auraient pour effet d'en augmenter le prix. Pour mobiliser l'effet "silo" il est même meilleur de réduire le taux de compactage au minimum pour pouvoir faire circuler les engins.

Cette solution peut s'adapter aux parties déversantes de l'ouvrage ou être associée à un déversoir poids en béton compacté.

#### CONCLUSIONS

Le développement du béton compacté semble ouvrir une solution économiquement intéressante dans de nombreux sites de barrage. On peut améliorer cette économie :

. **en réduisant le coût unitaire**, soit en facilitant la construction, soit en recherchant des spécifications peu contraignantes, notamment grâce à une bonne étanchéité amont,

. **en réduisant le volume de béton**, notamment par des tracés en arc, mais il est difficile de faire des voûtes relativement minces avec des bétons compactés peu coûteux,

. **en utilisant le béton compacté dans des sites où les fondations sont médiocres.**

Il semble que l'association du béton compacté avec des remblais en terre ou en enrochement peut ouvrir des possibilités dans ces différentes directions, le mode de construction du béton compacté permettant d'ailleurs la montée simultanée des différentes natures de matériaux.

Les exemples de solutions mixtes béton-remblai présentés semblent montrer, en les évaluant avec des prix usuels, des possibilités d'économie, variables naturellement suivant les sites envisagés, les hauteurs d'ouvrages et les conditions économiques locales.

Dans les solutions du premier et du troisième types les remblais n'interviennent que par leur poids dans la stabilité et pour faciliter la construction. Leur coût devra donc être très réduit. Les solutions du deuxième type sont au contraire des barrages en enrochement où le béton compacté n'est utilisé qu'en soutènement et pour permettre le déversement.

La plupart des exemples ci-dessus n'ont été étudiés que d'une manière sommaire : il est possible qu'une étude plus poussée fasse apparaître, dans certains cas, des problèmes de conception ou d'exécution qui en réduisent l'intérêt économique; il paraît cependant probable que certains sites puissent convenir économiquement à des solutions mixtes béton-remblai, soit analogues à l'un des exemples ci-dessus, soit d'un autre type, car de très nombreuses autres solutions paraissent envisageables.

Dans les comparaisons économiques, il y a lieu de tenir compte non seulement des volumes d'ouvrages, mais des coûts comparés des fondations, dérivations, évacuateurs de crue et des facilités d'exécution et de programme influant sur les coûts unitaires. Enfin, à sécurité égale, il est possible que les règles de calcul applicables soient différentes de celles qu'on applique traditionnellement aux ouvrages en béton ou aux ouvrages en remblai.

Imprimerie de Montligeon  
61400 La Chapelle Montligeon  
Dépôt légal : octobre 1989  
N° 14754  
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>*