

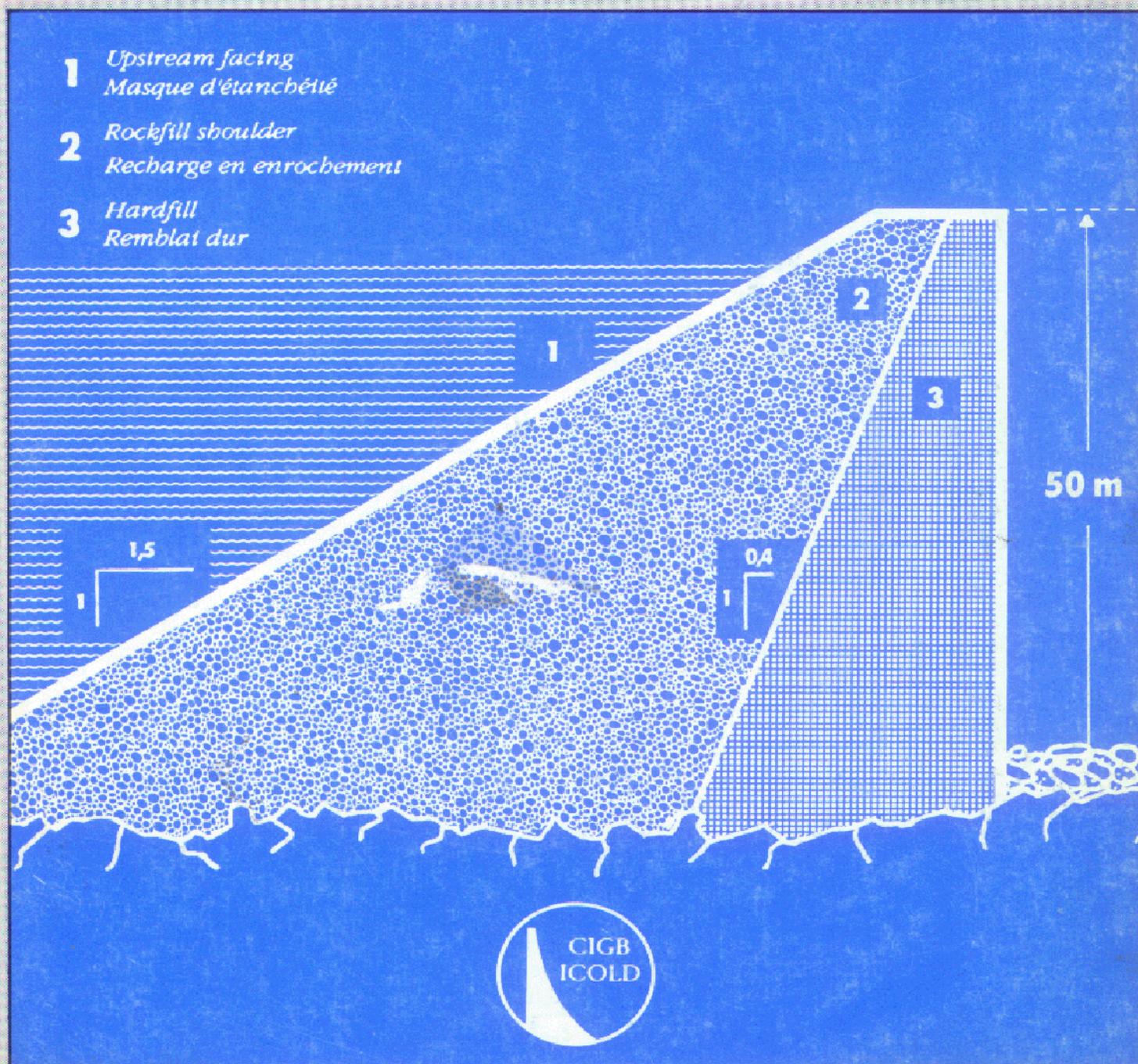
COST IMPACT ON FUTURE DAM DESIGN

Analysis and proposals

EVOLUTION DES BARRAGES INFLUENCE DES COÛTS

Analyses et suggestions

Bulletin 83



1992

The cover sketch is taken from Appendices I and II.
It shows a modification to a Chinese concept to suit other materials
(see “Dam Construction by the Chinese People” — chapter 4).

*La figure de couverture est tirée des Annexes I et II.
Il s’agit de l’adaptation de réalisations chinoises à l’emploi d’autres matériaux
(voir « Dam Construction by the Chinese People » — chapitre 4).*

Original text in French
English translation by R. Chadwick (France)

*Texte original en français
Traduction en anglais par R. Chadwick (France)*

COST IMPACT ON FUTURE DAM DESIGN

Analysis and proposals

EVOLUTION DES BARRAGES INFLUENCE DES COUTS

Analyses et suggestions

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

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

COMMITTEE ON TECHNOLOGY OF DAM CONSTRUCTION
COMITÉ DE LA TECHNOLOGIE DE CONSTRUCTION DES BARRAGES
(1989-1991)

Chairman/Président Brazil/Brésil	E. M. AMARAL
Vice-Chairman/Vice-Président France/France	F. LEMPÉRIÈRE
Members/Membres	
Australia/Australie	M. G. DELANEY
Austria/Autriche	H. PÖCHHACKER
Canada/Canada	J. A. LABBE
China/Chine	J. TAN
Germany/Allemagne	J. KÖNGETER
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	G. T. MIKELADZE
Yugoslavia/Yougoslavie	K. NEIMAREVIC

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. CONDITIONS D'ÉVOLUTION
NON DIRECTEMENT LIÉES
AUX COÛTS
 3. RAISONS D'ÉVOLUTION
LIÉES AUX COÛTS
 4. POSSIBILITÉS D'ÉVOLUTION
DES PROJETS DE BARRAGES
 5. COMPARAISONS ENTRE
OUVRAGES
 6. DISPOSITIONS FACILITANT
LES ÉCONOMIES
 7. CONCLUSION
- ANNEXES I, II

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. COST-INDEPENDENT FACTORS
AFFECTING CHANGE
 3. COST-RELATED REASONS
FOR CHANGE
 4. OPPORTUNITIES FOR CHANGE
IN DAM ENGINEERING
 5. COMPARISONS BETWEEN
DESIGNS
 6. NEW PROCEDURES FOR
PROMOTING SAVINGS
 7. CONCLUSION
- APPENDICES I, II

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	7
1. INTRODUCTION	8
2. CONDITIONS D'ÉVOLUTION NON DIRECTEMENT LIÉES AUX COÛTS	12
2.1. Données écologiques et sociales	12
2.2. Recherche de la sécurité	12
2.3. Évolution des matériaux	18
2.4. Frein des idées reçues	18
3. RAISONS D'ÉVOLUTION LIÉES AUX COÛTS	26
3.1. Données économiques sur les barrages récents	26
3.2. Coûts et performances de divers matériaux	36
3.3. Nécessité et coût de l'étanchéité des barrages	42
3.4. Analyse des coûts de la maîtrise de la rivière	46
3.5. Observations diverses liées aux coûts	50
4. POSSIBILITÉS D'ÉVOLUTION DES PROJETS DE BARRAGES	52
4.1. Orientations pour la recherche d'économies	52
4.2. Maîtrise provisoire ou définitive des crues	54
4.3. Exemples d'ouvrages ou dispositions non classiques	58
5. COMPARAISONS ENTRE OUVRAGES	62
5.1. Comparaison pour les pays à coût de main-d'œuvre élevé	62
5.2. Comparaison pour les pays à faible coût de main-d'œuvre	74
5.3. Observations générales	76
6. DISPOSITIONS FACILITANT LES ÉCONOMIES	80
6.1. Conditions actuelles	80
6.2. Dispositions suggérées	82
7. CONCLUSION	86
ANNEXE I	88
ANNEXE II	110

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	7
1. INTRODUCTION	9
2. COST-INDEPENDENT FACTORS AFFECTING CHANGE	13
2.1. Ecological and social background	13
2.2. Safety	13
2.3. Changes in constructional materials	19
2.4. Prejudice as an obstacle to change	19
3. COST-RELATED REASONS FOR CHANGE	27
3.1. Cost data from recent dams	27
3.2. Materials costs and performance	37
3.3. Need for, and cost of, watertightness	43
3.4. Cost of river control	47
3.5. Sundry remarks on costs	51
4. OPPORTUNITIES FOR CHANGE IN DAM ENGINEERING	53
4.1. Cost-saving options	53
4.2. Temporary and permanent flood control	55
4.3. Examples of unconventional designs	59
5. COMPARISONS BETWEEN DESIGNS	63
5.1. Comparisons for countries with high labour costs	63
5.2. Comparisons for countries with low labour costs	75
5.3. General remarks	77
6. NEW PROCEDURES FOR PROMOTING SAVINGS	81
6.1. Present conditions	81
6.2. Suggested procedures	83
7. CONCLUSION	87
APPENDIX I	89
APPENDIX II	111

AVANT-PROPOS

Durant les dernières décennies, l'évolution de la technique des barrages a été moins rapide que dans la plupart des autres secteurs du génie civil, par exemple ponts, travaux portuaires, tunnels et immeubles-tours.

Ce Bulletin discute des changements possibles dans la construction des barrages en vue de l'optimisation des coûts. Il vise à mettre en question les idées reçues et à stimuler la recherche de solutions nouvelles, plutôt qu'à introduire de nouvelles règles ou à présenter des solutions toutes prêtes.

La mise en œuvre de l'innovation en technologie dépend d'un effort de réflexion et de collaboration entre diverses parties. Dans le cas des barrages, il s'agit des maîtres d'ouvrage, organismes de contrôle, ingénieurs conseils et entrepreneurs. Ce Bulletin s'adresse donc à tous ceux qui ont à connaître de l'ingénierie des barrages.

Il a été préparé pour le Comité de la Technologie de Construction des Barrages, par François Lempérière, Vice-Président du Comité, et Pierre Londe, Président Honoraire de la CIGB, avec la collaboration de Claude Bessière. Je suis heureux de leur adresser nos félicitations et nos chaleureux remerciements.

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

FOREWORD

During recent decades, the evolution of dam engineering has been slower than in most areas of civil engineering, e.g. bridges, harbour works, tunnels and highrise buildings.

This Bulletin reviews possible changes in dam construction needed to optimize construction cost. It aims at questioning conventional wisdom and at stimulating enquiry into alternatives rather than introducing new rules or ready-made solutions for any situation.

Implementation of innovations in technology depends on reflection and cooperation between several parties. In dam engineering, these include owners, regulatory agencies, consulting engineers and contractors. This Bulletin is addressed to all those involved with dam engineering.

It has been prepared for the Committee on Technology of Dam Construction by François Lempérière, Committee Vice-Chairman, and Pierre Londe, Honorary President, ICOLD, with the assistance of Claude Bessière. I am pleased to extend to them our congratulations and warmest thanks.

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

1. INTRODUCTION

L'évolution des projets de barrages est relativement lente depuis une cinquantaine d'années ; elle résulte surtout de l'enseignement des accidents ou incidents, mais beaucoup de projets ne prennent en compte ni l'évolution économique des moyens et des matériaux, ni l'apparition de procédés et matériaux nouveaux : géotextiles, parois moulées, BCR, terre armée, etc. Enfin, de nombreuses technologies développées pour d'autres grandes structures soumises aux effets de l'eau (réservoirs, offshore, travaux portuaires, etc.) ne sont pas souvent utilisées pour la construction des barrages.

L'évolution des ouvrages est au contraire très rapide dans beaucoup d'autres domaines ; on peut donc se demander si les raisons économiques ne justifient pas dans le domaine des barrages une révolution et non une évolution.

Il est certes essentiel de rappeler que la sécurité des ouvrages est un impératif primordial, plus encore pour les barrages que dans beaucoup d'autres domaines, mais de nombreuses habitudes acquises ou idées reçues freinent souvent l'innovation de manière injustifiée et sans améliorer réellement la sécurité.

C'est pourquoi, dans le présent rapport :

Le chapitre 2 analyse les impératifs liés à la sécurité en distinguant, d'une part les bases réelles de la sécurité, et d'autre part des règles s'appliquant plus ou moins bien suivant les ouvrages.

Il examine les orientations liées à l'environnement, les habitudes et idées reçues pour discerner ce qui est justifié de ce qui est inutilement coûteux.

Le chapitre 3 situe par quelques chiffres l'importance relative actuelle des différents éléments du coût global des barrages en fonction de leur hauteur.

Il analyse l'influence des performances demandées et des spécifications imposées sur le coût des constituants essentiels des barrages : remblais meubles et rocheux, bétons ordinaires ou compactés, ainsi que sur celui de matériaux peu utilisés actuellement : béton armé, acier, « remblai dur », remblai utilisé uniquement comme lest,...

Ce chapitre analyse par ailleurs les coûts directs et indirects de l'étanchéité recherchée, les coûts du contrôle provisoire et définitif de la rivière (dérivation et déversoir).

Le chapitre 4 cherche à définir l'évolution probable des barrages, notamment en ce qui concerne l'étanchéité, le contrôle des crues et de nouvelles solutions pour le corps du barrage.

Le chapitre 5 compare, pour diverses hauteurs, conditions de fondations et conditions hydrauliques, les ouvrages les plus classiques et les ouvrages non classiques. Cette comparaison porte sur l'économie et la sécurité. Elle est faite de manière différenciée pour les pays à coût élevé de main-d'œuvre et pour les pays à faible coût de main-d'œuvre ; ces derniers possèdent la moitié des barrages construits dans le monde.

1. INTRODUCTION

New developments in dam design have been relatively slow over the last fifty years and have mostly been spurred by lessons from incidents and accidents; many designs fail to reflect changes in plant and materials costs or the appearance of new methods and materials like geotextiles, cast-in-place diaphragm walls, RCC, reinforced earth, etc. Much of the technology developed for other water-retaining and water-resisting structures (storage reservoirs and tanks, offshore structures, harbour works, etc.) has not often been transposed to dam engineering.

Change in other areas of engineering has been rapid, and it is legitimate to ask whether economics should not incite the dam profession to revolution rather than evolution.

Safety is of course the governing factor in dams more than in any other construction activity, but habit and prejudice do tend often to hamper innovation for no real reason, and without truly improving safety.

The report examines this argument.

Chapter 2 looks at safety requirements in terms of real safety-promotion as opposed to the rules whose application to a given project may or may not be justified.

It examines how dams are affected by their environment, and reviews a number of stereotyped ideas to try to discern what is sound from what is unnecessarily costly.

Chapter 3 offers a few statistics to assess the relative weight of the various cost components of dams being built today, on the basis of height.

It examines the impact of the design criteria and specifications on the cost of the main usual materials : earth and rockfill, conventional and roller compacted concrete, or other materials like reinforced concrete, steel, “hard fill”, weighting fill, etc.

The direct and indirect cost of the impervious component, and the cost of temporary (river diversion) and permanent (spillways) river control are also examined.

Chapter 4 is an attempt at predicting the probable future developments in dam engineering, especially as concerns watertightness, river control and possible new designs for dam body.

Chapter 5 compares the most usual (and sometimes unusual) designs of dams for different ranges of dam height, foundations and hydraulics, in terms of cost and safety, with a further breakdown into low and high labour cost countries (the former possessing half the dams in the world).

Le chapitre 6 étudie comment mieux comparer les coûts des ouvrages futurs et adapter les procédures de choix pour faciliter l'évolution des barrages.

Annexes :

Des solutions non classiques qui résultent logiquement des considérations du rapport et peuvent offrir des économies importantes sont présentées en annexe. Elles doivent être considérées comme une base de réflexion pour de futurs projets et non comme des solutions confirmées.

* *
*

La mise en application des concepts présentés devra naturellement donner lieu à des études détaillées des divers problèmes techniques et tenir particulièrement compte de la sécurité.

Chapter 6 examines how future dam costs can be better compared and how selection procedures might be changed to encourage further progress in dam design.

Appendices

Unusual alternatives which emerge logically from the foregoing considerations and may offer large savings are presented in the appendices: they should be considered as a possible basis for future design studies and not as proven solutions.

* *
*

Before implementation of concepts presented, detailed studies shall of course be necessary for technical problems and particularly with regard to safety.

2. CONDITIONS D'ÉVOLUTION NON DIRECTEMENT LIÉES AUX COÛTS

2.1. DONNÉES ÉCOLOGIQUES ET SOCIALES

La construction d'un barrage modifie nécessairement l'équilibre écologique et social, aussi bien dans la zone du réservoir qu'à l'aval. L'opinion publique est de plus en plus sensible à ces aspects, parfois trop négligés dans le passé. Le déplacement de populations rendu nécessaire par l'établissement du réservoir doit être planifié longtemps à l'avance et les conditions d'accueil des « déplacés involontaires » préparées soigneusement. Sinon les maîtres d'ouvrage peuvent se trouver confrontés à des situations de crise grave, allant jusqu'à l'impossibilité sociale ou politique de construire. L'acuité de ce problème peut être très variable suivant les pays.

L'évolution des idées sur l'aspect écologique des barrages est complexe, mais l'appréciation de ces impacts se fait de mieux en mieux, surtout depuis qu'on a pris conscience qu'ils n'étaient pas les mêmes en environnement tempéré, ou aride, ou tropical. L'importance de la qualité de l'eau du réservoir (eutrophisation, H²S, taux de renouvellement de l'eau), de leurs lâchures (pour éviter les érosions d'aval), de la sédimentation, de la régulation des crues et des étiages, du développement de parasites vecteurs d'épidémies et d'épizooties (bilharziose, riftfever, etc.), est bien reconnue aujourd'hui et retentit directement sur la *conception* des organes de déversement et de vidange, ainsi que sur leurs modalités d'*exploitation*.

Un autre aspect mis en avant par les défenseurs de l'environnement est la détérioration du paysage naturel dont sont souvent responsables, et d'une façon irréparable, les zones d'emprunt des matériaux, notamment les carrières. Dans bien des cas, la solution pourrait être fournie par une variante du projet de barrage ou l'utilisation de matériaux situés dans l'emprise de la retenue.

Lorsque ces dispositions sont correctement mises en œuvre, et l'expérience montre que c'est possible, le barrage et son réservoir sont loin d'être la catastrophe écologique que certains ont prétendu qu'ils étaient toujours. A la différence d'autres sources d'énergie, ils ne polluent pas l'atmosphère et n'attaquent pas la couche d'ozone stratosphérique. Ils sont *le seul* moyen de *gérer l'eau*, le bien le plus précieux pour l'homme.

Ces considérations seront prises en compte avec une attention grandissante et retentiront fortement sur la conception des barrages futurs.

2.2. RECHERCHE DE LA SÉCURITÉ

Quel que soit le type de barrage et qu'il soit en projet, ou en construction, ou en exploitation, un problème permanent est posé : celui de la sécurité. Ce thème est sous-jacent à toutes nos démarches, plus aujourd'hui que jamais. Il stimule les développements les plus spéculatifs, il passionne les statisticiens, il motive les règlements et les cahiers des charges et, fait nouveau, il est entré dans les médias où il a une forte résonance dans la société toute entière.

2. COST-INDEPENDENT FACTORS AFFECTING CHANGE

2.1. ECOLOGICAL AND SOCIAL BACKGROUND

Building a dam inevitably affects the pre-existing ecological and social balance in the reservoir area and downstream of the site. Public opinion is increasingly sensitive to such changes, which may indeed have been somewhat overlooked in the past. The moving of population from the reservoir area must be planned well in advance and careful consideration given to the new locations for such "displaced persons", or developers may find themselves confronted with a serious crisis which, at the extreme, may prevent construction of the dam for social or political reasons. Importance given to this problem may vary considerably from one country to the other.

There has been a complex change in ideas on the ecological benefits or otherwise of dams, but we can now assess impacts much more accurately, especially since we realised that they are not the same in temperate, arid and tropical climates. The importance of water quality in the reservoir (eutrophication, hydrogen sulphide content, water renewal rate), release through the dam, reservoir siltation, river regulation in terms of base and peak flows, and opportunities for the growth of parasites (which are the vectors for human and animal epidemics like bilharzia, rift fever, etc.) is now a recognised fact which is directly reflected in the *design* of spillways and outlets and their *operating rules*.

Another charge levelled by conservationists is the often irreparable damage to the countryside caused by many quarries and borrow pits. A solution might frequently be found in changing the design of the dam or using materials from the reservoir area.

When these steps are implemented correctly and experience shows that this approach is quite feasible, a dam and reservoir is far from being the ecological disaster that some claim it necessarily to be. Unlike other energy resources, dams do not pollute the atmosphere or damage the ozone layer. They are the *only* means of *managing* man's most precious resource: *water*.

These considerations will be given even more attention in the future and will have a strong impact on the design of tomorrow's dams.

2.2. SAFETY

Regardless of dam type and whether the project is in design stage, partially completed or in operation, safety is an ever-present preoccupation. It underlies all our actions, today more than ever. It stimulates the most speculative developments, it excites statisticians, it encourages the drafting of regulations and specifications and, for the first time, it has been taken up by the media and become a topic of concern for the public at large.

Il est évident que dans ce contexte aux facettes multiples il n'existe pas une appréciation unique de ce qu'est la sécurité d'un barrage. Les concepts sont divers et parfois divergents. Mais ils ont tous, à différents niveaux, joué un rôle et ils continuent de jouer ce rôle dans l'évolution des techniques de conception et d'exploitation des barrages.

Pour le grand public qui admet passivement les risques naturels, il est en revanche inadmissible qu'un barrage se rompe. Et pourtant les statistiques indiquent que les séismes, les inondations, les ouragans et autres catastrophes naturelles font en moyenne 150 000 morts par an dans le monde, alors que les ruptures de barrages ne sont la cause, toujours en moyenne, et sur les vingt dernières années, que d'une centaine de morts par an. Mais ce nombre est encore trop élevé car il est vécu non pas comme une fatalité mais comme un tribut payé aux insuffisances de la technique et qui pourrait donc être évité. Ce tribut est ressenti comme d'autant plus inique qu'il est payé par des personnes qui n'avaient pas librement choisi de prendre un risque mais à qui ce risque avait été *imposé* par la construction d'un barrage dont ils ne tiraient pas toujours d'avantages particuliers.

La CIGB s'efforce depuis de nombreuses années d'analyser par les *statistiques d'accidents* les véritables causes des ruptures de barrages, pour mieux les maîtriser et en réduire les effets. On constate notamment que les barrages en béton sont statistiquement beaucoup plus sûrs que les barrages en remblai (dans le rapport de 2 à 1 pour l'ensemble de la période de 1920 à 1975). Les progrès techniques tendent aujourd'hui à réduire cette différence attribuable en partie à la qualité de fondation exigée par les ouvrages en béton. Mais ceux-ci sont moins vulnérables au déversement, ce qui les maintiendra souvent en position plus favorable que les barrages en terre. On constate aussi que, tous types de barrages confondus, les barrages construits depuis 1960 sont cinq fois plus sûrs que ceux construits dans la première moitié du siècle. Aujourd'hui le taux d'accidents graves à l'échelle mondiale est tombé à une moyenne d'environ 5.10^{-5} par barrage et par an. Il est en voie de se réduire encore grâce aux progrès des méthodes de projet et de surveillance dont il va être question maintenant.

Pendant très longtemps l'ingénieur a couvert les incertitudes de son projet (données hydrologiques, géologiques, mécaniques) en introduisant dans ses calculs déterministes des *coefficients de sécurité forfaitaires*.

Ces coefficients étaient en général imposés par des textes réglementaires. Le développement des méthodes de calcul *probabilistes* a mis en évidence les graves imperfections de la démarche déterministe. En effet, à un même coefficient de sécurité peuvent correspondre des probabilités de ruine très différentes selon la qualité statistique des données ; par exemple, la probabilité de ruine peut varier de 10^{-2} à 10^{-7} suivant le nombre d'essais utilisés, leur dispersion, etc. Mais si l'on veut traiter l'évaluation de la sécurité d'une manière probabiliste, la seule qui soit fondamentalement correcte, on tombe sur une grave difficulté : comment quantifier les lois de distribution des paramètres incertains, particulièrement pour les valeurs extrêmes, qui sont celles qui entrent justement dans le calcul des conditions de rupture ? C'est contre cet obstacle qu'a buté longtemps l'effort pour développer la démarche probabiliste. Mais cet effort n'a pas été vain. Il a ouvert la voie à ce que l'ingénieur pratique de plus en plus couramment : *l'analyse paramétrique*, dégageant les facteurs les plus significatifs du problème à traiter, c'est-à-dire identifiant les paramètres « lourds », ceux sur lesquels il faut prendre les marges de sécurité et faire les mesures de contrôle.

In an area with so many different aspects, there can quite obviously be no single definition of what dam safety is. Concepts differ, and sometimes diverge. But they have all made their contribution at different levels, and are continuing to influence the process of change in dam design and operation.

While the public passively accepts natural hazards, they consider it unacceptable that a dam should fail. Yet it is a statistical fact that earthquakes, flooding, storms and other natural disasters kill an average of 150 000 persons worldwide every year, whereas dam failures over the last twenty years have caused only about a hundred deaths annually in all. But this figure is still too high because it is perceived not as an act of God, but as a tithe on engineering error, which could be avoided. A levy seen as being all the more unjust in that it is paid by individuals who did not accept the risk as a free choice but on whom it was *imposed* by the building of a dam from which they did not draw always particular personal benefit.

ICOLD has, for many years, collated *accident statistics* to determine the true cause of dam failures as a means of combating them and reducing their consequences. This has revealed that, statistically, concrete dams are much safer than embankment dams (by a factor of two for the period 1920-1975). Technical progress is tending to narrow this gap which is partly due to the quality of foundation necessary for concrete dams. They are less vulnerable to overtopping and this will put them in a better position than earth embankments. Another observation is that, taking the dam population as a whole, those built since 1960 are five times safer than those built in the first half of the century. Today, the rate of major accident worldwide has fallen to an average of around $5 \cdot 10^{-5}$ per dam per year, and is still falling, by virtue of the design and monitoring methods discussed in the next paragraphs.

For many years, the engineer had to allow for hydrological, geological and mechanical uncertainty in his design by applying *safety factors* in his deterministic calculations.

This was usually imposed by official regulations. The growth of *probability analysis* revealed the serious shortcomings of the deterministic approach. A given safety factor can represent a range of different probabilities of collapse depending on the statistical quality of the input data. For example, the probability of collapse might range from 10^{-2} to 10^{-7} depending on the number of tests performed, their scatter, etc. But a serious difficulty arises in any attempt to evaluate safety on a probability basis, which is the only fundamentally proper way : how can the distribution patterns of uncertain parameters be quantified, especially with respect to extreme values, which are just the one relevant to failure conditions? Efforts to develop probability approach stumbled on this obstacle for a long time, but they were not wasted. They opened the way for what engineers now use on an everyday basis, *parametric analysis*, which discovers the most significant, the most “weighty” factors, those needing safety margins and control tests.

Alors que le coefficient de sécurité, nombre unique, ne traduit nullement la réalité mécanique et sa complexité, l'analyse paramétrique permet de cerner les véritables conditions d'équilibre en mettant en évidence la signification des données incertaines, qu'elles soient des résistances ou des actions, qu'elles soient aléatoires dans l'espace ou dans le temps.

S'il est vrai qu'on peut ainsi réduire considérablement le risque de rupture ou de mauvais fonctionnement du barrage, on ne peut pas amener la probabilité de ruine à une valeur nulle. Il restera toujours une part irréductible de risque, qui tient à des raisons diverses. L'une de ces raisons est l'impossibilité d'accéder à une connaissance parfaite des conditions naturelles. Cette lacune est particulièrement marquée pour les petits barrages, dont les budgets des reconnaissances sont nécessairement limités et pour lesquels un défaut caché dans la fondation ou une erreur sur l'hydrologie peuvent avoir des conséquences graves. Il faut savoir aussi que nos modèles physiques et mathématiques sont toujours imparfaits et une proportion non négligeable des ruptures constatées résulte de mécanismes qui échappent totalement à l'analyse rationnelle *a priori* : dégradation des matériaux avec l'âge, érosion interne des remblais ou des fondations, etc., à quoi s'ajoute la possibilité d'erreur humaine dans l'exploitation (beaucoup de barrages ont péri faute d'ouverture des vannes alors que la crue était annoncée).

L'*auscultation*, de préférence conçue par le projeteur du barrage, peut être le meilleur moyen de réduire le résidu de risque que les meilleures méthodes d'analyse ne pourront supprimer totalement. Lorsqu'elle comporte des appareils fiables, durables et précis, l'*auscultation* s'est révélée un moyen efficace d'augmenter la sécurité des barrages. On assiste aujourd'hui à une véritable mutation de la stratégie des grands maîtres d'ouvrage : le suivi de la sécurité est assuré par la *télésurveillance en temps réel*. La mesure des paramètres significatifs (fuites, pressions d'eau interne, déplacements) est centralisée et traitée par des moyens informatiques. Les comportements anormaux sont ainsi immédiatement détectés.

Le caractère anormal est interprété comme tel par les modèles mathématiques corrects dont il vient d'être question et dont c'est peut être le rôle principal pour l'évaluation de la sécurité *a posteriori*.

L'exploitant est averti, avant qu'il ne soit trop tard, d'interventions d'entretien requises et, dans les cas extrêmes, des mesures d'urgence qu'il convient de prendre pour assurer la protection des populations d'aval. Il est remarquable que la plupart des catastrophes dues à des ruptures de barrages se sont produites sur des barrages privés d'instruments de mesure, et qu'inversement celles-ci auraient sans doute perdu leur caractère de catastrophe si une *auscultation* moderne avait été installée.

Cette évolution des stratégies peut être fondamentale. Elle constitue le progrès le plus important des récentes années et ne peut manquer d'avoir un impact sur la conception des barrages du futur. Cette meilleure maîtrise de la sécurité est grandement favorable à l'innovation qui n'est plus alors synonyme de risque.

Les avantages de l'*auscultation* pour accroître la sécurité ne doivent pas réduire la qualité du projet et de la réalisation, ni l'importance de l'interprétation du comportement des barrages par les spécialistes, mais cette interprétation est alors basée sur des informations plus précises et plus sûres.

Where the single safety factor concept has no relation to the complexity of real physical situations, parametric analysis identifies the true requirements for stability by revealing the meaning of uncertain data (which may be strength values or actions, or may be temporally or spatially random).

This approach can substantially reduce the risk of poor dam performance or failure, but it cannot bring down the probability of collapse to zero. There must always remain some finite core of risk, for many reasons, one of which is the impossibility of acquiring any perfect knowledge of the natural conditions at the dam. This is more noticeable for small dams with necessarily limited site investigation budgets, and where a hidden defect in the foundation or an error in estimating the hydrology can have serious consequences. It must also be realised that our physical and mathematical models are never perfect and a not inconsiderable proportion of failures are due to mechanisms which are not amenable to scientific analysis and prediction, such as the deterioration of materials with time, internal erosion in embankments and foundations, etc..., to which is added the possibility of human error in operation (many dams have been destroyed because of failure to open the gates when a flood was forecast).

Performance monitoring, preferably designed by the engineer responsible for the design of the dam, may be the best way to further reduce the core of risk that the best analytical methods cannot completely eliminate. When the monitoring system incorporates reliable, durable, precision instruments, it has shown itself to be an efficient means of enhancing dam safety. We are currently seeing a possible revolution in safety strategy, with *real-time supervision* through *telemetered data*. Instrument readings on significant parameters like leakage, internal water pressures and displacements are sent directly to a computer, so that relevant anomalous trends are detected immediately.

Abnormal behaviour is defined with respect to proper mathematical models as mentioned above, and this is perhaps their most important contribution for post-facto safety evaluation.

The operator is warned in time of corresponding maintenance work that might be needed or, in some extreme cases, of emergency action required to protect downstream population. It is noteworthy that most disasters from dam failure have occurred at dams unequipped with monitoring systems, and that conversely, effects would doubtlessly not have been so disastrous if modern instruments had been installed.

This change in strategy may be fundamental. It is the most important step forward in recent years and must inevitably have an impact on the design of tomorrow's dams. Improved safety control is extremely conducive to innovation, which thereby ceases to be synonymous with higher risk.

The advantages of monitoring for improving of safety do not reduce the necessary quality of design and construction, or the importance of human interpretation of dam performance, but such interpretation is based upon more precise and factual information.

2.3. ÉVOLUTION DES MATÉRIAUX

Les plus anciens barrages connus étaient en maçonnerie de pierre sèche et en terre. Au cours des millénaires, en tirant les leçons d'innombrables accidents, les constructeurs ont amélioré à la fois la maçonnerie et les remblais. La maçonnerie, grâce aux progrès des liants, a permis l'obtention de formes nouvelles, en particulier du barrage-voûte. Mais c'est le *béton* qui en est l'aboutissement actuel, permettant la construction d'ouvrages très minces et très sûrs. Quant aux *remblais*, en grande partie grâce à la mécanique des sols, ils ont évolué vers des architectures rationnelles où les fonctions de résistance, d'étanchéité et de maîtrise du risque d'érosion interne sont arrivées à une quasi-perfection sur le plan technique sans toujours correspondre à l'optimum économique.

Une catégorie de remblais s'est particulièrement développée dans ces dernières décennies. Il s'agit du barrage en enrochement à masque amont, qui, avec le barrage-voûte, passe pour un des types d'ouvrage les plus sûrs. Là encore les matériaux ont joué un rôle capital dans son évolution, tant par la maîtrise des tassements de l'enrochement que par le choix du masque. A l'origine ce dernier était en bois ; il est aujourd'hui en béton bitumineux ou plus souvent en béton armé (objet de nombreux progrès, notamment en ce qui concerne la couche support du revêtement). Il est probable que les tentatives pour utiliser l'acier ou les matières plastiques seront reprises prochainement.

Un dernier né, certainement voué à un brillant avenir, est le béton compacté au rouleau ou BCR, hybride entre le béton et le remblai. Ce matériau nouveau, qu'on peut considérer comme un *remblai dur*, ouvre la voie à des formes de barrage nouvelles, comme on le verra plus loin. L'histoire des techniques montre que ce sont les matériaux nouveaux qui appellent des formes nouvelles et non l'inverse. Ajoutons que les progrès des moyens d'exécution, tant au plan technique qu'économique, retiennent aussi sur l'évolution des formes.

2.4. FREIN DES IDÉES REÇUES

L'histoire des barrages montre, comme celle des autres technologies, que les progrès ont été faits par des ingénieurs qui ont su se libérer des idées reçues de leur époque. Il est donc du plus haut intérêt, si l'on cherche à prédire les barrages du futur, d'analyser les idées reçues d'aujourd'hui qui freinent l'innovation.

La liste qui suit, donnée sous une forme schématique où *volontairement les nuances ont été omises pour frapper plus fort*, mérite d'être méditée. Elle contient l'essentiel, croyons-nous, de ce que les progrès de l'avenir auront à effacer de nos réflexes irrationnels. Chacune de ces idées reçues est suivie d'un bref commentaire qui donne les principaux motifs de penser que c'est souvent une idée fausse.

a) *L'application scrupuleuse des règlements et des codes garantit la sécurité*

Les règlements sont faits pour aider les ingénieurs les moins compétents à ne pas faire de faute majeure. En réalité, ils n'y réussissent pas, dans la mesure où ils dispensent de la réflexion. Un barrage est un ouvrage « sur mesures », où seules les lois de la physique et de la mécanique ont un sens. Il est frappant de constater que la plupart des grands accidents se sont produits malgré la conformité des ouvrages

2.3. CHANGES IN CONSTRUCTIONAL MATERIALS

The oldest dams known to us were built with drystone masonry and earth. Dam builders have drawn on the lessons from innumerable accidents over the centuries to improve both masonry and embankment material. With improved jointing materials, stone was used to develop new shapes, like the arch dam, but it has now been superseded by *concrete*, suitable for thin and safe structures. *Embankment dams*, benefiting largely from the science of soil mechanics, have evolved towards rational architectures in which strength, watertightness and the control of internal erosion have reached near-perfection in engineering terms, although not always as regards cost optimisation.

One type of embankment dam that has undergone considerable development in recent decades is the rockfill dam with watertight upstream facing which, like the arch dam, has a reputation for being one of the safest types. Here too, materials technology has been a prime factor as regards the control of settlement of the rockfill and facing design. This was originally timber, but is now bituminous or more often reinforced concrete (CFRD), and its improvements, (such as the deck underlayer), and attempts at using steel and plastics will probably be resumed shortly.

A new technique, which certainly has a very bright future, is roller compacted concrete (RCC), a hybrid of concrete and embankment dam practice. This new material can be considered as a *hard fill* and opens the way to new shapes, as is discussed later. History shows that it is new materials which create new shapes, not the reverse. It should be added that improved constructional plant in terms of engineering performance and cost also has an impact on structural shapes.

2.4. PREJUDICE AS AN OBSTACLE TO CHANGE

History shows that, in dams as in other engineering areas, progress comes from engineers who have freed their minds of the set ideas of their times. If we wish to try and predict what dams will be in the future, it is therefore highly instructive to look at today's set ideas opposing innovation.

The list below, which is purposely schematic *and crudely expressed for impact*, merits reflection. We believe it contains most of what future change will need to overcome our unquestioning response. Each stereotype is followed by brief comments on the chief reasons for believing the idea is often false.

a) *Strict adherence to regulations and codes of practice is a guarantee of safety*

Rules and regulations are designed to help less competent engineers to avoid major errors. They cannot in fact succeed as far as they dispense with the need to think. A dam is a « one-off » job where only the laws of physics and mechanics have any meaning. Rules which are based upon past experience and bitter errors must be reassessed by experienced engineers in each particular case. It is a striking fact that most

aux règlements. Les règles qui sont basées sur l'expérience et les erreurs reconnues doivent être repensées par des ingénieurs expérimentés dans chaque cas particulier.

b) Toute innovation comporte un risque accru

Ceci n'est vrai que des innovations qui n'ont aucune référence passée. Mais, en général, les innovations les plus fécondes ne sont que le développement logique, ou la combinaison, d'expériences probantes antérieures. Les premières voûtes étaient des barrages-poids arqués. Les premiers barrages en BCR utilisaient un matériau connu par ailleurs. On oublie d'ailleurs trop souvent que la plupart des barrages sont innovants, les conditions naturelles de rivière et de fondation et le dimensionnement des ouvrages étant rarement identiques.

c) Plus un barrage-voûte est épais plus il est sûr

Les statistiques favorables sur la sécurité des voûtes minces prouvent le contraire. Cette notion erronée vient de raisonnements en contraintes, alors que dans la majorité des cas ce qui importe c'est la distribution des forces totales. Cependant, il est vrai que :

- Une minceur excessive n'améliore ni la sécurité ni l'économie,
- La bonne qualité de la fondation pour l'appui des voûtes est un élément clé de la sécurité.

d) Toute économie de volume est une économie de coût

L'expérience prouve que ce n'est vrai que si les conditions de construction restent les mêmes. Beaucoup oublient qu'en raffinant les formes pour réduire les volumes on peut perdre plus qu'on ne gagne. Il en est de même pour les ouvrages annexes, comme les dérivations provisoires et les batardeaux.

e) Tous les barrages nécessitent une reconnaissance, des études et un contrôle d'exécution très poussés

Une reconnaissance soigneuse, des études poussées, un contrôle et une auscultation de qualité sont fortement recommandés pour les grands barrages, mais en fait le montant d'investissement de 80 % de ce que l'on appelle « les Grands Barrages » (et notamment les barrages de moins de 30 m) est compris entre 1 et 5 millions US\$ et la dépense totale de reconnaissance, d'études et de contrôle est souvent limitée : la connaissance des conditions locales et le contrôle de la construction sont donc en fait généralement beaucoup plus réduits que dans le cas d'un barrage plus important.

Il est donc justifié, si les fonds disponibles sont restreints, de choisir pour un petit barrage le type d'ouvrage le moins vulnérable pour un site donné. On peut ainsi être amené à éliminer la solution en remblai classique au profit d'un ouvrage tolérant la submersion sans dommages ou s'adaptant mieux à des défauts éventuels de la fondation.

major accidents have occurred at dams designed and built in accordance with regulations.

b) *Innovation increases risk*

Only true with innovations for which no previous experience exists. But in general, the most fruitful innovations are only the logical development or combination of proven earlier experience. With few exceptions, the first arch dams were in fact arched gravity dams. Most of the first RCC dams were using a familiar material. Most of classical dams are in fact innovating because river and site conditions as well as detailed designs are not often identical to previous schemes.

c) *A thicker arch dam is a safer dam*

Very good statistics upon safety of thin arches prove the contrary. This wrong idea comes from reasoning in stresses whereas, in most cases, it is the distribution of the total forces that is important. However, it is true that:

- Excessive reduction of thickness does not improve safety or economy,
- Good foundation quality is a key condition for arch abutments.

d) *Less volume means less cost*

Experience shows that this is only true if construction conditions are the same. Many forget that more may be lost than gained by refining shapes to obtain the least volume. The same applies to the appurtenant works like diversion works and cofferdams.

e) *All dams need important investments for investigation studies and control*

Careful site investigation, sophisticated design studies, experienced supervision and instrumentation are strongly advocated for large dams. But actually for 70 % or 80 % of the so called "Large Dams" (generally those under 30 m height) the investment is between \$US 1 and 5 millions and the total expense for site investigation studies and control is often limited: actually knowledge of site conditions and control of construction are not so good as for a larger dam.

Therefore, if funds for a small dam are limited, we are justified in recommending the least vulnerable type for a given site. This may mean discarding the usual embankment dam in favour of a type that can tolerate overtopping without damage or better accommodate defects in the foundation.

f) *Toute dépense augmentant la sécurité d'un barrage est justifiée*

La sécurité n'a de sens qu'en regard des dommages qu'entraînerait un incident ou même une rupture. Dans bien des cas ces dommages potentiels, si on les évaluait correctement, se révéleraient mineurs. La sécurité d'un ouvrage n'a pas, contrairement à ce qu'impliquent la plupart des règlements, une valeur absolue. Par exemple, dans certains cas, si des dégâts sur le déversoir ne mettent pas le barrage en danger, un revêtement réduit peut être justifié si l'économie est supérieure à la valeur totale des réparations et dommages durant la vie du barrage.

D'autre part, il ne faut pas oublier qu'une augmentation du volume des travaux entraîne une augmentation du risque d'accidents corporels pendant la construction. Or le nombre des victimes des chantiers de barrages dans le monde dépasse de près de dix fois le nombre des victimes causées par les ruptures de barrages.

g) *Il est souhaitable de se couvrir contre la crue maximale probable (PMF)*

En réalité, la crue à considérer ne peut être dissociée du risque qu'elle crée. C'est le risque réel, dans chaque cas particulier, qui doit être pris en compte, et non une crue « réglementaire ». Il en est de même pour la protection du chantier pendant la construction. Ces notions peuvent paraître évidentes et pourtant elles ne sont que rarement prises en compte correctement.

h) *Un déversoir vanné fait gagner sur le coût total du barrage*

Ceci est vrai car le barrage est moins haut pour le même niveau normal de réservoir, mais on sous-estime généralement le risque grave, et réel comme le prouve l'expérience, d'une ouverture tardive, ou insuffisante, ou complètement manquée, des vannes. Nombre de barrages en terre se sont rompus à la suite du déversement résultant d'une faute de manœuvre des vannes.

Les statistiques montrent que ces ruptures se sont produites pour moitié sur des barrages à déversoir vanné, alors que ceux-ci ne représentent que le tiers de la population totale des déversoirs.

Ajoutons que des dommages graves peuvent résulter de l'ouverture intempestive des vannes, créant une crue plus soudaine et plus forte que la crue naturelle. Il convient donc de chiffrer le risque en regard de l'économie du premier investissement et des avantages des vannes pour gérer la retenue ou parfois réduire la sédimentation.

Cependant, le passage des crues par un seuil libre ne réduit pas l'intérêt des vannes de fond pour la vidange éventuelle des réservoirs.

i) *Il est impossible de laisser l'eau déverser sur un barrage en remblai*

Cette affirmation coûte cher, en conduisant au surdimensionnement des déversoirs et des revanches. Il est évident que des recherches s'imposent pour que le déversement sur un remblai n'entraîne pas sa ruine. Il existe des voies prometteuses qui mériteraient d'être exploitées pour des barrages de hauteur modérée, comme les gabions en tôle ou l'association avec du BCR ou protection aval en grillage ou treillis (Bulletin CIGB 48). On reviendra sur ces solutions dans la suite du rapport.

f) *Any expenditure to increase dam safety is justified*

Safety is only meaningful in terms of damage that would be caused by an incident or failure. In many cases, potential damage, if it were properly evaluated, would be found to be minor. Contrary to what is implied in most official regulations, safety has no absolute value. For instance, for certain dams, if spillway damage does not threaten the dam, then reduced lining can be justified on the basis that capital savings outweigh the overall value of expected repairs and flood damage during the service life.

Nor must it be overlooked that increasing the amount of work involved increases the risk of personal injury to the labour force. There are about ten times more victims of dam construction jobs in the world than victims of dam failures.

g) *It is advisable to design dams for the Probable Maximum Flood (PMF)*

In fact, the flood considered cannot be dissociated from its attendant risk. It is the actual risk in each particular case that must be used, not a "regulation" flood. The same applies to the flood protection for the jobsite during construction. These ideas may appear self-evident, yet they are rarely applied properly.

h) *A gated spillway lowers the total cost of the dam*

True, since the dam crest will be lower for the normal full supply level in the reservoir. But the serious and, as shown by experience, very real risk of gates not being opened early enough, or not wide enough, or even not at all, is generally underestimated. Many earth dams have been washed away because gate operating errors led to overtopping.

According to the statistics, gated spillways account for half of such dam failures, whereas they represent only one-third of the total spillway population.

It must also be remembered that serious damage can be caused by gates being opened at the wrong times, and causing a larger and more sudden flood than the natural river flood. Risks must therefore be quantified and compared with the saving on first cost and advantages of gates to manage the reservoir or sometimes reduce sedimentation.

However, using ungated spillways does not prevent bottom outlets being provided for possible lowering of the reservoir.

i) *Water must never be allowed to flow over an embankment dam*

This belief is a very expensive one, since it leads to oversized spillway capacity and freeboard. Research is of course necessary for overspilling not to destroy an embankment dam, but there are promising opportunities that deserve to be exploited for low to medium height dams, like sheet-metal gabions or combinations with RCC or downstream mesh protection (ICOLD Bulletin 48). These possibilities are examined further in the report.

j) Un barrage et sa fondation doivent être étanches

Le concept d'étanchéité est relatif. Il est des cas où une fuite est parfaitement tolérable, pourvu qu'elle ne soit pas évolutive. Dans beaucoup d'aménagements ne pas rechercher l'imperméabilité totale conduirait à des économies importantes sans pour autant réduire la sécurité.

k) Une route de crête n'est pas chère

En fait, il serait souvent beaucoup plus avantageux d'établir la route ailleurs que sur la crête du barrage, en évitant le pont sur le déversoir et de grands encorbellements amont et aval. Une route de crête influence le tracé et les coûts de l'ouvrage, et interdit ainsi la possibilité de certaines solutions plus économiques. Elle nécessite souvent des accès coûteux et n'est guère utilisable pendant les travaux, mais il est très rare que l'étude comparative soit faite et le coût indirect d'une route de crête est souvent sous-estimé.

l) Il est contre-indiqué d'associer dans la section du barrage des matériaux rigides et des matériaux déformables

Moyennant des dispositions appropriées, cette association est, comme on le verra dans la suite du rapport, tout à fait possible et génératrice de solutions sûres et économiques. Elle nécessite une bonne connaissance des matériaux concernés et peut être délicate dans les zones très sismiques.

j) *A dam and its foundation must be watertight*

Watertightness is a relative concept. There are cases where leakage is perfectly acceptable provided it does not get worse. Not attempting to obtain complete impermeability would lead to substantial savings on many projects without affecting safety.

k) *A crest road is not expensive*

In fact, it would often be much more beneficial to place the road elsewhere than on the crest and so dispense with the bridge over the spillway and large overhangs on the upstream and downstream sides. A crest road imposes straight or gently curved layouts and influences the cross sections and so prevents a number of possibly cheaper solutions. Accesses are often costly and the road cannot be used during construction, but alternatives are very rarely compared and the indirect cost of a crest road often underestimated.

l) *Stiff and deformable materials should not be combined in the dam section*

With appropriate arrangements, such combinations are, as will be discussed later, quite feasible and capable of producing safe and economical designs. Materials involved should be carefully studied. Such combinations may be difficult in very seismic areas.

3. RAISONS D'ÉVOLUTION LIÉES AUX COÛTS

3.1. DONNÉES ÉCONOMIQUES SUR LES BARRAGES RÉCENTS

Les chiffres ci-dessous correspondent aux ouvrages terminés dans la période de quatre ans entre 1983 et 1986 et sont tirés du Registre Mondial des Barrages.

Le Tableau 1 donne, pour les pays de la CIGB (non compris la Chine), la répartition par type et par hauteur de ces ouvrages.

Tableau 1

HAUTEUR (m)	NOMBRE PAR TYPE D'OUVRAGES (1983-1986, non compris la Chine)				
	Terre	Enroch.	Poids	Voûte	TOTAL
15 à 29	358	21	58	12	449
30 à 59	134	60	45	9	248
60 à 99	30	43	21	7	101
100 à 149	11	16	4	4	35
≥ 150	2	6	—	3	11
TOTAL	535	146	128	35	844

Les barrages en terre, qui représentent 80 % des ouvrages de moins de 30 mètres, ne représentent qu'environ 30 % des ouvrages de plus de 60 mètres.

En affectant aux barrages de hauteur H un coût essentiellement proportionnel à H² (en réalité le coût moyen paraît augmenter un peu plus vite que H²), la répartition des coûts globaux par type et par hauteur serait la suivante par le jeu d'un coefficient traduisant la loi en H².

Tableau 2

HAUTEUR (m) moyenne admise	NOMBRE PAR TYPE D'OUVRAGES (1983-1986 hors Chine)					Coef.	VALEUR GLOBALE ESTIMÉE PAR TYPE D'OUVRAGES					
	Terre	Enroch.	Poids	Voûte	Total		Terre	Enroch.	Poids	Voûte	TOTAL	
15 à 29 (20)	358	21	58	12	449	× 1	358	21	58	12	449	8,5 %(*)
30 à 59 (40)	134	60	45	9	248	× 4	536	240	180	36	992	19,0 %
60 à 99 (75)	30	43	21	7	101	× 15	450	645	315	105	1 515	29,0 %
100 à 149 (125)	11	16	4	4	35	× 40	440	640	160	160	1 400	26,5 %
≥ 150 (180)	2	6	—	3	11	× 80	160	480	—	240	880	17,0 %
TOTAL	535	146	128	35	844		1 944	2 026	713	553	5 236	100 %
	<u>63,5 %</u>	<u>17,5 %</u>	<u>15 %</u>	<u>4 %</u>	<u>100 %</u>		<u>37,5 %</u>	<u>38,5 %</u>	<u>13,5 %</u>	<u>10,5 %</u>	<u>100 %</u>	

(*) Ce pourcentage ne correspond qu'aux ouvrages (hors Chine) construits de 1983 à 1986. Il est presque double si l'on considère tous les ouvrages construits à ce jour.

3. COST-RELATED REASONS FOR CHANGE

3.1. COST DATA FROM RECENT DAMS

The figures quoted come from projects completed in the four-year period 1983-1986 and are taken from the World Register of Dams.

The Table 1 lists the breakdown, by type and height, for all ICOLD countries excluding China.

Table 1

HEIGHT (m)	NUMBER PER TYPE (1983-86, excl. China)				
	Earth	Rockfill	Gravity	Arch	TOTAL
15-29	358	21	58	12	449
30-59	134	60	45	9	248
60-99	30	43	21	7	101
100-149	11	16	4	4	35
≥ 150	2	6	—	3	11
TOTAL	535	146	128	35	844

Earth dams represent 80 per cent of dams less than 30 m high but only about 30 per cent over 60 m high.

If the cost of a dam of height H is taken as roughly proportional to H² (in fact, mean cost appears to rise rather more steeply), the breakdown of aggregate costs per dam type and height range can be tabulated, using a coefficient to reflect the H² law.

Table 2

HEIGHT (m) Range Mean	NUMBER PER TYPE (1983-1986 excl. China)					Coeff	ESTIMATED AGGREGATE VALUE PER TYPE					
	TE	ER	PG	VA	TOTAL		TE	ER	PG	VA	TOTAL	
15-29 (20)	358	21	58	12	449	× 1	358	21	58	12	449	8.5 %(*)
30-59 (40)	134	60	45	9	248	× 4	536	240	180	36	992	19.0 %
60-99 (75)	30	43	21	7	101	× 15	450	645	315	105	1 515	29.0 %
100-149 (125)	11	16	4	4	35	× 40	440	640	160	160	1 400	26.5 %
≥ 150 (180)	2	6	—	3	11	× 80	160	480	—	240	880	17.0 %
TOTAL %	535 63.5 %	146 17.5 %	128 15 %	35 4 %	844 100 %		1 944 37.5 %	2 026 38.5 %	713 13.5 %	553 10.5 %	5 236 100 %	

(*) Percentage for dams (excluding China) built between 1983 and 1986. Nearly doubles if all dams built to date are included.

Par ailleurs, la décomposition *moyenne* du coût est à peu près la suivante (d'après des études du Comité de Technologie portant sur 100 barrages de six pays différents) :

	<u>Barrages en remblai</u>	<u>Barrages en béton</u>
— dérivation et batardeaux	10 %	5 %
— excavations	9 %	9 %
— traitement des fondations	13 %	11 %
— corps du barrage	47 %	62 %
— déversoirs, vidange, etc.	21 %	13 %
	<u>100 %</u>	<u>100 %</u>

Cette décomposition varie naturellement beaucoup d'un barrage à l'autre, notamment en fonction de la fondation et de l'importance des crues. En se basant sur cette décomposition moyenne et sur les chiffres des Tableaux 1 et 2 précédents, et en admettant que le coût des déversoirs (vannés ou non) et des vidanges soit constitué en moyenne pour 2/3 par des travaux de génie civil et pour 1/3 par l'électromécanique, on obtient une estimation de la répartition globale suivante sur l'ensemble des barrages, 1983-1986 (hors Chine) :

— dérivation et batardeaux	9 %	
— excavations	9 %	} 21 %,
— traitement des fondations	12 %	
— corps des barrages en terre	17 %	} 34 %,
— corps des barrages en enrochement	17 %	
— béton ou maçonnerie des déversoirs	14 %	} 30 %,
— électromécanique	16 %	
	<u>6 %</u>	
	100 %	

Conclusion

L'importance économique globale des barrages en terre est souvent surestimée, de même que celle des barrages de moins de 30 mètres qui représentent environ 10 % de la valeur totale (Chine non incluse) des barrages récents.

Le pourcentage de barrages en enrochement croît avec la hauteur et leur valeur globale est comparable à celle des barrages en terre. Les dépenses globales de béton et de maçonnerie sont voisines des dépenses totales de remblai. Le pourcentage de voûtes augmente avec la hauteur ; en Chine, il est important pour toutes les hauteurs. Les dépenses globales des excavations sont très importantes ; il en est de même des coûts directs et indirects de la maîtrise de la rivière (dérivation, déversoir, etc.) qui représentent près de 30 % du coût total.

Le coût global d'un barrage en remblai représente en moyenne plus de deux fois le coût du corps du barrage et près de trois fois si le débit de crue est relativement important. Le coût global d'un barrage en béton est en moyenne d'environ 1,6 fois celui du corps du barrage.

Mean project cost component breakdowns taken from a study by the ICOLD Committee on Technology of 100 dams in six countries are as follows:

	<u>Embankment dams</u>	<u>Concrete dams</u>
River diversion and cofferdams	10 %	5 %
Excavation	9 %	9 %
Foundation treatment	13 %	11 %
Dam body	47 %	62 %
Spillways, outlets, etc	21 %	13 %
	<u>100 %</u>	<u>100 %</u>

This breakdown varies considerably according to the foundation and design flood of each dam. Based upon this mean breakdown and upon cost data in the above Tables 1 and 2, assuming that the cost of (gated and ungated) spillways and outlets breaks down on average as two-thirds for civil works and one-third for gates and associated equipment, we can estimate the following overall breakdown for dams built between 1983 and 1986 outside China.

River diversion and cofferdams	9 %	
Excavation	9 %	} 21 %,
Foundation treatment	12 %	
Dam body (earth)	17 %	} 34 %,
Dam body (rockfill)	17 %	
Dam body (concrete and masonry)	14 %	} 30 %,
Spillway concrete and masonry	16 %	
Gates, etc	6 %	
	<u>100 %</u>	

Conclusion

The overall economic weight of earth dams is often overestimated, as is that of dams less than 30 m high, which represent about 10 per cent of the total aggregate value of recent dams (outside China).

The percentage of rockfill dams increases with height and their overall value is comparable to that of earth dams. Total expenditure on concrete and masonry is similar to that for fill. The percentage of arch dams increases with height; in China, it is large for all heights. Overall expenditure on excavation is very large, and so are the direct and indirect costs of river control (diversion works, spillway, etc.) which represents nearly 30 per cent of total cost.

Total project cost for embankment dams represents on average 2.1 times the cost of the dam body, and nearly three times if river floods are relatively large. The total cost of a concrete dam is on average 1.6 times the cost of the dam body.

Tableau 3
Barrages achevés de 1983 à 1986
(hors de Chine)
Nature de fondation par type et par hauteur

Les chiffres totaux différent de ceux des
Tableaux 1, 2 et 4 car les informations
sur la fondation manquent pour certains
ouvrages et notamment pour les
15-29 m, aux USA et au Japon.

HAUTEUR (m)	NOMBRE PAR TYPE D'OUVRAGE				NOMBRE PAR TYPE DE FONDATION															
	Terre Enroch. Poids Voûte Total	17	32	8	273	Rocher	Rocher et Meuble	Meuble												
15 à 29	216	17	32	8	273	79	16	27	7	129	70	0	1	1	72	67	1	4	0	72
30 à 59	120	59	39	4	222	28	41	36	3	108	47	16	1	1	65	45	2	2	0	49
60 à 99	22	40	18	6	86	12	29	17	6	64	5	10	1	0	16	5	1	0	0	6
100 à 149	9	15	4	3	31	6	8	4	3	21	2	6	0	0	8	1	1	0	0	2
≥ 150	2	6	—	3	11	1	4	—	3	8	1	2	—	—	3	—	—	—	—	—
TOTAL	369	137	93	24	623	126	98	84	22	330	125	34	3	2	164	118	5	6	0	129

Table 3
Dams completed between 1983 and 1986
(Excl. China)
Foundation per type and height

Totals are different from those in Tables 1, 2 and 4 because foundation data is not available for some dams, especially 15-29 m in USA and Japan

HEIGHT (m)	NUMBER OF DAMS PER TYPE				NUMBER PER FOUNDATION															
	Earth Rockfill Gravity Arch Total	17	32	8	273	Rock	Rock and Soil	Soil												
15-29	216	17	32	8	273	79	16	27	7	129	70	0	1	1	67	1	4	0	72	
30-59	120	59	39	4	222	28	41	36	3	108	47	16	1	1	65	45	2	2	0	49
60-99	22	40	18	6	86	12	29	17	6	64	5	10	1	0	16	5	1	0	0	6
100-149	9	15	4	3	31	6	8	4	3	21	2	6	0	0	8	1	1	0	0	2
≥ 150	2	6	—	3	11	1	4	—	3	8	1	2	—	—	3	—	—	—	—	—
TOTAL	369	137	93	24	623	126	98	84	22	330	125	34	3	2	164	118	5	6	0	129

Tableau 4
Barrages achevés de 1983 à 1986
(hors de Chine)
Type et capacité de l'évacuateur (m³/s)

Les chiffres totaux diffèrent de ceux des
Tableaux 1, 2 et 3 car les informations sur
l'évacuation manquent pour certains
ouvrages, et notamment pour les
15-29 m, aux USA et au Japon.

HAUTEUR	NOMBRE PAR TYPE D'OUVRAGE				< 100 m ³ /s		100 à 1 000 m ³ /s		1 000 à 10 000 m ³ /s		> 10 000 m ³ /s		Total	
	Terre	Enroch.	Poids	Voûte	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V
15 à 29 m	178	10	33	7	76	5	51	14	7	23	0	2	134	44
					8	—	1	—	1	—	—	—	10	0
					5	—	10	3	5	8	—	2	20	13
					—	—	4	2	1	—	—	—	5	2
					228	89	5	66	19	31	—	—	169	59
30 à 59 m	109	55	44	9	21	2	41	9	19	10	1	6	82	27
					12	1	23	2	8	5	1	3	44	11
					7	—	18	4	4	11	—	—	29	15
					1	—	4	2	1	1	—	—	6	3
					217	41	3	86	17	27	2	9	161	56
60 à 99 m	21	42	20	7	1	—	6	2	3	7	—	2	10	11
					4	—	10	5	9	12	—	1	24	18
					—	—	5	2	5	6	—	2	10	10
					—	—	2	2	1	1	—	—	4	3
					90	6	0	23	11	18	26	1	48	42
100 à 149 m	6	14	4	3	—	—	1	—	—	4	—	1	1	5
					—	—	4	—	4	3	—	1	10	4
					—	—	—	—	1	2	—	1	1	3
					—	—	2	—	—	1	—	—	2	1
					27	—	—	7	—	5	10	2	14	13
+ 150 m	2	6	—	3	—	—	1	—	—	—	—	1	1	1
					1	—	—	—	—	—	—	1	3	3
					—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
					—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
					11	1	—	2	—	4	—	—	5	6
TOTAL	316	127	101	29	573	98	25	12	2	137	7	1	0	0
					8	100	38	33	13	184	25	7	9	6
					47	29	24	15	3	71	44	22	27	5
					98	1	4	0	0	5	12	6	5	0
					23	397	176							

Fondations

Le Tableau 3 ci-dessus donne des indications sur la fondation de la plupart des barrages réalisés de 1983 à 1986 (hors Chine) suivant leur type et leur hauteur. 40 % seulement des barrages de moins de 30 mètres de hauteur sont fondés entièrement au rocher ; mais au-dessus de 60 mètres, 75 % sont fondés entièrement au rocher et 20 % partiellement.

Évacuateurs

Le Tableau 4 ci-dessus donne des indications sur le type et la capacité du déversoir suivant la hauteur et le type de la plupart des ouvrages construits de 1983 à 1986 (hors Chine).

Le vannage (V) ou non (L) des déversoirs dépend peu du type de barrage, mais varie un peu suivant la hauteur et beaucoup suivant le débit.

— 25 % des évacuateurs ont une capacité de moins de 100 m³/s et ils sont très rarement vannés,

— 40 % des évacuateurs ont une capacité comprise entre 100 et 1 000 m³/s, 20 % de ces évacuateurs sont vannés,

— 30 % des évacuateurs ont une capacité comprise entre 1 000 et 10 000 m³/s, 60 % sont vannés,

— 5 % des évacuateurs ont une capacité au-dessus de 10 000 m³/s et 80 % sont vannés.

Au total, 30 % seulement des barrages récents de plus de 15 mètres ont des évacuateurs vannés et 50 % seulement des plus de 60 mètres.

La nature des barrages (remblai, poids, voûte) très influencée par le type de fondation et la hauteur paraît dépendre assez peu du débit du déversoir.

Utilisation des barrages

Pour l'essentiel, l'utilisation globale des barrages récents se répartit à peu près également entre l'hydroélectricité et le stockage d'eau (irrigation, eau potable, etc.), la maîtrise des crues n'intervenant que pour 10 % environ. L'utilisation pour le stockage, notamment pour l'irrigation, représente l'objectif essentiel pour les barrages de moins de 50 mètres, la production hydroélectrique devenant prédominante pour les hauts barrages.

Évolution

Le nombre de barrages construits par an de 1983 à 1986 (hors Chine) est plus faible que précédemment, mais cette réduction ne s'applique en fait qu'aux barrages de moins de 30 mètres, dont le coût global ne représente qu'une faible part des investissements totaux.

Disparités entre pays

Les chiffres qui ont été cités sont des moyennes globales et ils varient beaucoup à l'intérieur d'un pays et entre pays. Certaines disparités entre pays paraissent peu explicables par des raisons naturelles ou économiques, mais plus par des traditions ou des règlements ; par exemple, deux pays comparables peuvent mettre, l'un des vannes sur presque tous ses barrages, l'autre n'utiliser que des seuils libres. L'utilisa-

Foundations

The Table 3 presents foundation data for most dams built between 1983 and 1986 outside of China, broken down according to dam type and height. Only 40 per cent of dams less than 30 m high sit entirely on rock, but above 60 m height, 75 per cent have a complete, and 20 per cent a partial rock foundation.

Spillways

The Table 4 shows spillway type and capacity data per type and height of dams built between 1983 and 1986 outside China.

The choice of a gated (V) or uncontrolled (L) spillway is mostly independent of dam type but there is some correlation with dam height, and much more with discharge requirements:

- 25 per cent of the spillways have a capacity of less than 100 m³/s and are rarely gated,
- 40 per cent are designed for 100-1 000 m³/s and 20 per cent of these are gated,
- 30 per cent are designed for 1 000-10 000 m³/s, and 60 per cent are gated,
- 5 per cent have a capacity of more than 10 000 m³/s, and 80 per cent are gated.

In all, only 30 per cent of recently-built dams more than 15 m high have gated spillways, and only 50 per cent of those above 60 m.

While strongly influenced by foundation type and height, the choice of dam type (embankment, gravity, arch) appears not to be greatly affected by spillway discharge capacity.

Purposes of dams

The general purposes of most recent dams investments split fairly equally between hydropower and storage for irrigation, water supply, etc. ; flood control represents only about 10 per cent. Storage, especially for irrigation, is the main purpose for dams less than 50 m high, with hydroelectricity becoming predominant at high dams.

Trends

Fewer dams were built annually between 1983 and 1986 than before (excluding China), but the reduction only in fact affects those less than 30 m high, whose aggregate cost accounts for only a small part of total investment.

Disparities between countries

The figures quoted are overall averages and there is much variation within and between countries. Some disparities between countries are not readily explained by natural or economic factors but rather by tradition and regulations ; for example, one country might use gates on nearly all its dams while a similar country might prefer only uncontrolled overflows. Construction of arch dams is very variable from one

tion des voûtes est très variable suivant les pays ; il en est de même du recours aux barrages en enrochement, sans que cela s'explique seulement par la géologie ou par des raisons économiques, mais est souvent dû principalement à la tradition.

3.2. COÛTS ET PERFORMANCES DE DIVERS MATÉRIAUX

a) *Remblais en sols fins*

Le coût de base d'un remblai en sols fins (extraction et transport par moyens mécaniques) est bas, de l'ordre de 1 US\$/tonne, soit 2 US\$/m³(*), mais les sujétions (découverte, tri, traitement éventuel, teneur en eau, compactage, filtres, etc.) conduisent généralement à un coût global de 5 à 10 US\$/m³. Par ailleurs, les qualités mécaniques et drainantes médiocres conduisent à des volumes élevés ; le poids des remblais représente environ dix fois la poussée de l'eau (soit cinq fois plus que le poids d'un barrage béton gravité).

Les remblais fins résistant mal à l'érosion interne ou externe sont maintenant souvent remplacés pour les recharges par des remblais en enrochement, sauf pour les faibles hauteurs. Par ailleurs, le coût des barrages en terre augmente indirectement de plus en plus par les précautions prises sur les matériaux, ce qui favorise le développement des masques ou écrans artificiels (béton armé, écran bitumeux, parois moulées).

Dans les pays à faible coût de main-d'œuvre, les remblais de hauteur modérée sont parfois réalisés par des moyens manuels. Le nombre d'heures nécessaires pour l'exécution de 1 m³ de remblai est de l'ordre d'une vingtaine d'heures d'ouvriers et varie beaucoup suivant la distance ; l'utilisation d'emprunts proches du barrage est donc encore plus importante qu'avec des moyens mécaniques.

b) *Remblais en enrochement*

Le coût de base, de l'ordre de 2 US\$/tonne, est souvent porté à 5 US\$/tonne (10 US\$/m³) par les contraintes diverses imposées : qualité et tri des matériaux, épaisseur des couches, compactage, etc., mais des caractéristiques mécaniques et drainantes, supérieures à celles des remblais en sols fins, permettent de réduire les volumes nécessaires et lui donnent souvent la préférence pour les recharges des barrages de hauteur moyenne ou élevée.

L'utilisation progressive d'enrochement de moindre qualité, un meilleur zonage des barrages, une protection efficace pour permettre le passage des crues peuvent favoriser encore plus l'emploi de ce matériau lorsqu'il est disponible à proximité, ce qui est souvent le cas pour les barrages de plus de 30 m de hauteur.

En Australie, on utilise de manière usuelle des enrochements qui peuvent s'écraser durant le compactage, à condition que la densité soit suffisante et le volume des vides faible. Il y a souvent moins de tassements dans ces ouvrages que dans ceux dans lesquels ont été utilisées des roches volcaniques dures.

(*) On utilise ici le US \$ pour les références de prix afin de fixer des ordres de grandeur, mais ce sont les valeurs relatives des différentes parties d'ouvrage qui sont importantes.

country to another, as for rockfill dams, a fact which can be explained by geology or economics but is sometimes due mainly to tradition.

3.2. MATERIALS COSTS AND PERFORMANCE

a) *Earth dams*

The basic cost of mechanized winning and haulage of earth for dam construction is low, of the order of \$US 1 per tonne or \$US 2/m³(*), but the associated operations of stripping, sorting, processing (where required), moisture content control, rolling, filter material, etc, usually result in an overall cost of \$US 5-10/m³. In addition, poor mechanical and drainage properties require large volumes of fill whose weight represents about ten times more than the hydrostatic load (or five times more than an equivalent concrete gravity dam).

Soils with poor resistance to internal and external erosion are now often replaced in the shoulders by rockfill, except in low dams. The cost of an earth dam is tending to be pushed up indirectly by the precautions taken on materials, a trend which favours the growth of facings and core walls (reinforced concrete, bituminous core walls, diaphragm walls).

In countries with low labour costs, embankment dams of moderate height are still sometimes built without machines. Building a cubic metre of fill requires around twenty men x hours and depends greatly on the haul distance ; borrows close to the site are even more attractive than in mechanized methods.

b) *Rockfill dams*

The basic cost of around \$US 2/tonne is often increased to \$US 5/tonne (\$10/m³) by the associated operations : quality control and sorting, layer thickness, rolling, etc., but rockfill's superior mechanical and drainage properties as compared with fine soil enables smaller volumes to be used and often make it the better choice for the shoulders of moderate and high dams.

The steadily increasing use of poorer quality rockfill, better zoning, and efficient protection for the passage of floods may well spur still greater use of this material when available close to the dam site as often for dams over 30 m high.

In Australia, it is becoming practical to use rock which breaks up during rolling provided the required density is achieved or the voids ratio is low. There is often less settlement in these dams than in those built from hard volcanic rock.

(*) The US Dollar costs are quoted to give a general idea of levels, but what is important is the relative costs for different parts of a project.

c) *Remblais de lest*

On demande généralement aux remblais fins ou aux enrochements les qualités suivantes :

- du poids,
- des qualités étanches ou drainantes strictes,
- des qualités mécaniques (résistance au cisaillement),
- des tassements faibles pour éviter la fissuration des noyaux ou des masques.

Des économies sont souvent possibles dans le choix des matériaux ou les spécifications appliquées si on ne demande au remblai que du poids, et éventuellement des qualités drainantes. Cette utilisation de remblais qui sont alors essentiellement des remblais « de lest » peut être permise :

- par l'utilisation d'étanchéités par masque ou noyau, insensibles aux tassements des recharges,
- par l'association des remblais avec des matériaux rigides (béton, béton compacté, « remblai dur ») assurant la résistance mécanique des ouvrages.

L'utilisation de tels remblais peut être encore plus intéressante en cas de terrassements sans moyens mécaniques, car cela facilite l'utilisation d'emprunts proches et le réemploi à courte distance des matériaux des fouilles des ouvrages.

d) *Béton classique*

Son prix au m³ ou même à la tonne est beaucoup plus élevé que celui des remblais et au minimum de l'ordre de 30 US\$/tonne (75 US\$/m³) à majorer du coût très variable des coffrages. Le béton présente, par contre, trois qualités essentielles :

- des performances mécaniques élevées,
- une bonne résistance à l'érosion interne ou externe,
- une bonne étanchéité (de l'ordre de 10⁻¹⁰ m/s) moyennant diverses précautions coûteuses.

Ses performances ne sont pleinement utilisées que dans les barrages-voûtes qui sont compétitifs pour les vallées relativement étroites en bon rocher. Les barrages-poids en béton qui nécessitent de trop fortes quantités d'un matériau coûteux mal utilisé ne sont généralement justifiés que pour les déversoirs ou prises d'eau.

e) *Béton compacté au rouleau*

Ce terme est employé actuellement pour des matériaux dont les propriétés mécaniques sont analogues à celles du béton classique, mais dont les caractéristiques peuvent être cependant très variables. En effet, suivant les dispositions prises :

- les résistances mécaniques peuvent être égales ou supérieures à celles du béton classique, ou n'être que le tiers ou la moitié,
- la résistance à l'érosion interne est similaire à celle du béton classique, mais la résistance à l'érosion externe peut être un peu moins bonne que celle du béton classique pour des vitesses élevées en raison des irrégularités de surface,

c) *Weighting fill*

The properties demanded of earth and rockfill are usually :

- weight,
- well-defined imperviousness or draining characteristics,
- mechanical characteristics (shear strength),
- low settlement to prevent cracking core or facing.

Savings may be often obtained on material specifications if fill is only required to provide weight and, perhaps, good drainage. The use of such « weighting fill » can be made possible by:

- the use of a watertight core or facing that is unaffected by settlement in the shoulders, or,
- using fill in combination with rigid materials (concrete, RCC, hardfill) providing the necessary mechanical strength of the dam.

This type of fill can be even more attractive on unmechanized jobs, since borrow areas can be found nearer the dam and material from the foundation excavations can be re-used nearby.

d) *Conventional concrete*

The cost of concrete per unit volume or per tonne is higher than for fill material, never less than around \$US 30/tonne (\$75/m³), to which must be added the very variable cost of the shuttering. But concrete does have three very important qualities:

- excellent mechanical properties,
- good resistance to internal and external erosion,
- good watertightness (of the order of 10⁻¹⁰ m/s) subject to various costly precautions.

These qualities are only really used to the full in arch dams, which are competitive in relatively narrow valleys with good rock. Concrete gravity dams, inefficiently using overlarge quantities of a costly material used, are only usually justified for flood control.

e) *Roller compacted concrete*

RCC currently designates materials whose mechanical properties are similar to those of conventional concrete but whose characteristics can in fact be highly variable; depending on how it is used:

- strength may be equal or superior to that of conventional concrete, or only one-third or half,
- resistance to internal erosion is similar to that of conventional concrete but resistance to external erosion may not be quite so good at high flow velocities because of surface irregularities,

— la perméabilité globale qui dépend beaucoup des diverses précautions prises peut varier de 10^{-4} m/s à 10^{-12} m/s, ce qui correspond, pour un barrage, à un débit de fuite de quelques centaines de litres/seconde ou à des débits infimes.

Chacun des éléments de coût (dosage de liant, choix et traitement des granulats, transport et mise en place, joints et reprises, programme) peut varier de l'ordre de 1 à 2 suivant les qualités demandées, notamment en étanchéité.

Il paraît donc très souhaitable de retenir deux appellations différentes en fonction des caractéristiques recherchées :

1) *béton compacté au rouleau* ayant des caractéristiques en étanchéité et en résistance mécanique voisines de celles du béton classique. L'économie par rapport au béton classique est modérée, mais la réalisation plus rapide conduit à des économies indirectes importantes (intérêts financiers, coût des dérivations provisoires, etc.) ;

2) un matériau que l'on peut appeler « *remblai dur* » présentant les caractéristiques suivantes :

— résistance mécanique plus faible que celle du béton classique, mais suffisante pour l'ouvrage considéré,

— une résistance correcte à l'érosion interne, ce qui est facile à obtenir,

— des spécifications minimales en ce qui concerne l'étanchéité, la perméabilité globale recherchée pouvant varier de 10^{-4} à 10^{-6} m/s suivant les cas.

Ces caractéristiques peuvent permettre des économies très importantes, notamment dans le choix et le traitement des granulats et dans les contraintes de mise en place. Pour les granulats, on peut envisager l'emploi de carrières ou de gravières de qualité médiocre, ou même l'emploi de sable pur (sable-ciment) en adaptant les profils d'ouvrages aux performances des « remblais durs ». Des essais de matériaux doivent être réalisés en temps utile pour offrir une base réaliste aux solutions variantes.

f) *Maçonnerie*

De nombreux barrages sont réalisés en maçonnerie dans des pays à faible coût de main-d'œuvre, en particulier en Chine et en Inde, surtout pour des barrages inférieurs à 60 mètres. De telles réalisations peuvent nécessiter 100 ou 200 heures de main-d'œuvre par m³ de maçonnerie, mais beaucoup moins si le chantier est partiellement mécanisé. Le coût unitaire, variant peu avec la forme, conduit en Chine à la réalisation de nombreux barrages-voûtes ; l'étanchéité des barrages en maçonnerie est souvent améliorée, en Inde ou en Chine, par un parement en béton. *Le nombre total de barrages en maçonnerie de plus de 15 mètres en construction dans le monde (et notamment en Chine(*)) est du même ordre que celui des barrages en béton.*

g) *Béton armé*

Son coût au m³ est élevé, notamment pour des formes complexes, mais son utilisation en étanchéité est attractive techniquement et économiquement. Le coût au m² d'une telle étanchéité est généralement de l'ordre de 100 à 200 US\$ pour des masques sur remblais ou des murs verticaux de forme simple.

(*) (réf. « Large Dams in China », 1987, p. 30)

— overall permeability, which can vary greatly according to methods used, may range from 10^{-4} m/s to 10^{-12} m/s, representing leakage rates through the dam of several hundred litres/second to almost none.

Individual cost factors (cement content, aggregate type and processing, transport and placement, contraction and construction joints, works programme) may vary by a factor of up to 2 depending on the qualities required, especially watertightness.

It is useful therefore to use two different names, corresponding to different requirements:

1) *Roller compacted concrete* whose imperviousness and strength is similar to conventional concrete. The saving in cost is moderate but the shorter construction time leads to indirect savings (interest on loans, cost of diversion works, etc.)

2) A material which might be called “*hardfill*”, having the following properties:

- lower strength than conventional concrete, but sufficient for the structure in question,
- adequate resistance to internal erosion, which can be easily obtained,
- minimum requirements as regards watertightness, specified overall permeability perhaps ranging from 10^{-4} to 10^{-6} m/s as needed.

Such properties can lead to very important savings, especially in the choice and processing of aggregate and placing methods. It might be possible to consider using poor quarries and borrows, or even neat sand (sand cement mix) if the dam profile is tailored to the performance of this “*hardfill*” material. Corresponding materials should be tested in due time to offer a sound basis to alternative solutions.

f) *Masonry*

Many dams are still being built of masonry in countries with cheap labour like China and India, especially for dams less than 60 m high. Such dams may need 100-200 hours labour input per cubic metre of masonry, but much less if using some mechanical equipment. Since unit costs are not seriously affected by structural shapes, China has been building many arch dams; the watertightness of masonry dams is often improved in India or China by adding a concrete facing. *The total number of masonry dams more than 15 m high under construction throughout the world (mainly in China^(*)) is roughly the same as for concrete dams.*

g) *Reinforced concrete*

Cost per unit volume of reinforced concrete is high, especially for complex shapes, but it is attractive in both engineering and cost terms for providing watertightness. Watertight facings to embankments or vertical walls of simple shape cost around \$US 100-200 per square metre.

(*) (See “Large Dams in China”, 1987, page 30).

h) *Acier pour étanchéité*

La tôle d'acier est utilisée comme étanchéité sous des pressions élevées et avec des spécifications contraignantes dans beaucoup de domaines :

- conduites forcées,
- construction offshore,
- construction navale,
- réservoirs d'eau, de pétrole, etc.

Les épaisseurs les plus courantes sont d'environ 10 à 50 mm.

Bien que l'acier soit utilisé dans les barrages pour les vannes et les blindages, il n'est utilisé qu'exceptionnellement pour l'étanchéité globale. Le coût d'une telle étanchéité, aussi bien pour des ouvrages en remblai classique qu'en « remblai dur », serait de 100 à 200 US\$/m². Il peut s'adapter facilement à des formes variées, présente des avantages de rapidité et de facilité de raccordement, il s'adapte mieux que le béton armé ou que les noyaux en terre à des mouvements importants des remblais ou des fondations. L'entretien ou la réparation d'un masque en acier ne présentent pas plus de difficultés que pour le béton armé, sous réserve de précautions adéquates pour les joints et de surépaisseur ou de protection pour la corrosion.

i) *Parois moulées*

Les progrès techniques des dernières décennies permettent à la fois ;

- leur utilisation dans les remblais, les fondations meubles, les éboulis et la plupart des roches,
- la réalisation d'une bonne étanchéité de l'ensemble des parois,
- l'adaptation des caractéristiques aux mouvements que l'on peut attendre.

Les coûts peuvent varier de 100 à 500 US\$/m² suivant les terrains et les quantités.

j) *Géotextiles et géomembranes*

Leur faible coût et les progrès techniques, notamment pour la stabilité à long terme, permettent des solutions très économiques pour l'étanchéité et les filtres des ouvrages de faible hauteur.

L'importance de leur emploi dans l'avenir pour de grands ouvrages est difficile à prévoir en l'absence d'expérience de longue durée.

k) *Autres matériaux*

De nombreuses possibilités seront offertes par d'autres matériaux (par exemple béton de fibres ou de fumée de silice, ancrage par câble, terre armée...).

3.3. NÉCESSITÉ ET COÛT DE L'ÉTANCHÉITÉ DES BARRAGES

On associe parfois la notion de sécurité d'un barrage à la faiblesse du débit qui passe à travers l'ouvrage. Cette notion plus ou moins consciente est souvent peu réaliste, et un barrage en enrochement à masque perdant 100 litres/seconde peut être

h) *Watertight steel facings*

Steel plates are used as a watertight material for high-pressure applications, to very stringent specifications, in many areas, for:

- penstocks and pressure tunnel linings,
- offshore structures,
- naval architecture,
- storage tanks for water and oil, etc.

Usual thicknesses range from about 10 to 50 mm.

While steel is common in dam engineering for gates and linings, it is used only exceptionally for the main imperviousness facing. A facing for a conventional or “hardfill” embankment dam would cost around \$US 100-200/m². It can be readily shaped, it can be quickly and easily joined, and it accommodates itself better than reinforced concrete or earth cores to large movements in the underlying fill or foundation. Maintenance and repairs to steel linings involve no more difficulty than for reinforced concrete, subject to proper dispositions for joints and extra thickness or protection for long term corrosion.

i) *Diaphragm walls*

Technical progress in recent decades has meant that :

- cast-in-place diaphragm walls can now be successfully built in embankments, soil foundations, scree and most rocks,
- the whole wall can be made satisfactorily watertight,
- characteristics can be tailored to suit expected movements.

Costs range from \$US 100 to \$US 500 per square metre depending on ground, depth and quantities.

j) *Geotextiles and geomembranes*

Low cost and improved performance (especially as regards long term stability) now make them a very economical choice for the watertight components and filters for low dams.

The extent of their use in future at larger dams is difficult to predict in the absence of any long term experience.

k) *Other materials*

Many possibilities are or will be offered by a number of other materials, such as fiber or silica fume concrete, reinforced earth, cable anchors, etc.

3.3. NEED FOR, AND COST OF, WATERTIGHTNESS

Safety of a dam is sometimes equated with the low level of leakage passing through it. This more or less unconscious reflex is often rather unrealistic, and a rockfill dam with upstream facing discharging 100 l/s may be much safer than

beaucoup plus sûr qu'un barrage en terre homogène perdant 1 000 fois moins. Il est naturellement souhaitable d'éviter les fuites, mais ce n'est pas toujours indispensable, et la limite admissible, très variable en matière de sécurité suivant le type d'ouvrage, dépend également d'un bilan économique (perte d'eau ou de kWh) et de considérations psychologiques (mauvaise réputation d'un « ouvrage qui fuit », aspect du parement aval, etc.).

La sécurité ne résulte pas de la valeur absolue du débit de fuite, mais du fait que ce débit n'augmente pas avec le temps et que la pression de l'eau s'applique bien où on l'a prévue.

a) *Justification économique de l'étanchéité*

Les fuites des barrages sont souvent très faibles par rapport à l'évaporation ou la pluie sur le réservoir qui représentent de l'ordre de 50 l/s/km².

La valeur économique de l'eau perdue par les fuites varie beaucoup suivant l'ouvrage et sa destination :

— elle peut être nulle si le volume des fuites est inférieur au débit minimal imposé en aval,

— près de 10 % des barrages peuvent admettre, sans aucune perte sur le plan économique, des débits de fuite de plusieurs m³/s ; il peut s'agir d'ouvrages pour le contrôle des crues, d'aménagements hydroélectriques sous-équipés, d'ouvrages devant garantir un débit réservé important, etc.

Pour les ouvrages hydroélectriques, une fuite de 100 l/s peut être d'une incidence très faible pour un barrage de basse chute, mais très pénalisante pour des aménagements de très haute chute.

Un grand nombre d'ouvrages a pour but essentiel le stockage annuel d'eau pour l'irrigation, l'eau potable, etc... La durée moyenne de stockage étant de l'ordre de 6 à 8 mois, une fuite de 100 l/s représentant une perte de 1,5 à 2 millions de m³ peut être admissible pour des retenues d'une centaine de millions de m³, mais une perte de 10 l/s est très pénalisante pour des retenues inférieures à 1 million de m³. Sur le plan économique, on peut donc être plus tolérant sur la perméabilité des grands ouvrages que sur les petites retenues.

Sur le plan strictement économique, les contraintes d'étanchéité sont donc extrêmement variables d'un barrage à l'autre, les débits globaux de fuites acceptables pouvant varier de quelques l/s à plusieurs m³/s.

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour l'étanchéité des barrages (noyau, masque, béton) conduisent très généralement à des débits de fuite négligeables au point de vue économique. Dans la mesure où cela ne nuit pas à la sécurité, on pourrait souvent envisager une relaxation des spécifications sur le béton ou l'utilisation de solutions innovantes ou classiques plus économiques même si elles conduisent à des fuites plus importantes.

b) *Sécurité et étanchéité*

Aucun projet de barrage ne se fie à une étanchéité parfaite et *il est toujours essentiel de prendre des dispositions pour que les fuites éventuelles soient évacuées sans dommage et pour que l'étanchéité de l'ouvrage ait bien lieu à l'emplacement prévu.*

a homogeneous earth dam losing 1 000 times less. It is of course preferable but not always essential to prevent leakage and the acceptable limit, which varies greatly in terms of safety with different types of dam, is also dependent on economics (loss of water or electricity generation) and psychological considerations (a “leaky dam” has a poor reputation, downstream face is disfigured, etc).

Safety is not determined by the absolute leakage rate, but by discharge not following a rising trend and the water pressure acting only where it should.

a) *Economic justification of watertightness*

Dams leakage is generally small as compared with importance of evaporation or rain in the reservoir (in the range of 50 l/s/km²).

The money value of water lost through leakage depends to a large extent on the dam and water use:

— it may be non existent if leakage is less than minimum flow required downstream,

— nearly 10 per cent of dams can accept a leakage loss of several m³/s without any economic impact, e.g. flood control dams, underplanted hydro power dams, dams releasing a large compensation water flow to maintain downstream levels, etc.

For hydroelectric schemes, leakage of 100 l/s may be very acceptable for a low head dam, but very costly for high pressure power plants.

Many dams have for main purpose yearly storage for irrigation, potable water, etc. Time of storage being in the range of 6 to 8 months, a leakage of 100 l/s means a loss closed to 2 millions cubic metres which may be acceptable for reservoir in the range of 100 millions cubic metres, but a leakage of 10 l/s is hardly acceptable for small reservoirs. In economic terms, higher permeability may be more acceptable for large reservoirs than for small ones.

Economic impact of watertightness is extremely variable, leakage rates ranging from some l/s to several m³/s.

Characteristics of materials generally used for waterproofing dams (cores, facings, concrete) allow generally leakage rates unimportant on economic terms. As far as this is no detrimental to safety it could often be possible for instance to soft specifications for concrete or to use innovative or classical solutions more economical even if they allow more leakage.

b) *Watertightness and safety*

No dam design relies on perfect watertightness and *it is always vital to take steps to ensure that any leakage will be drained away without damage and that the dam is watertight where, and only where it is required.* But acceptable leakage rates in terms of safety vary greatly with different types of dam.

Mais les débits admissibles sur le plan de la sécurité varient beaucoup suivant les types d'ouvrages :

— Pour les ouvrages en terre homogène ou à noyau, on recherche en général des débits totaux infimes et presque toujours de moins de 1 l/s, ce qui, pour un ouvrage de 10 000 m² et de profil courant, correspond à une perméabilité inférieure à 10⁻⁷ m/s. Pour de tels ouvrages, ce sont donc généralement des conditions de sécurité et non d'économie qui fixent la perméabilité admissible.

— Les barrages en enrochement à masque peuvent souvent admettre des débits de plusieurs centaines de l/s et il en est de même, en fait, des ouvrages en béton ou en béton compacté (pour lesquels interviennent alors des problèmes d'aspect du parement aval qui conduisent généralement à des dépenses élevées pour réduire les fuites sans justification sur le plan de la sécurité ou de l'économie).

c) Coût de l'étanchéité

En dehors de son coût direct, l'étanchéité influe souvent beaucoup sur les coûts unitaires de la totalité de l'ouvrage par les précautions prises pour éviter la fissuration du noyau des barrages en remblai ou les taches d'humidité du parement aval des barrages en béton.

Pour résumer, la perméabilité admissible d'un barrage peut être fixée :

— par des conditions économiques qui requièrent des perméabilités généralement comprises entre 10⁻⁶ et 10⁻⁷ m/s pour les petits ouvrages de stockage d'eau, et souvent de 10⁻⁵ à 10⁻⁶ m/s pour les ouvrages hydroélectriques ou pour les grandes retenues de stockage.

— par des raisons d'aspect, ce qui est souvent le cas des ouvrages en béton,

— par la sécurité, c'est notamment le cas des barrages en terre où l'on recherche une perméabilité inférieure à 10⁻⁷ m/s.

Mais, pour d'autres barrages (béton, béton compacté, remblai dur, enrochement avec masque), la fixation d'un très faible niveau de fuite n'est pas toujours nécessaire au niveau de la sécurité et peut conduire à choisir des solutions plus coûteuses ou moins sûres, ou peut causer des surcoûts inutiles.

3.4. ANALYSE DES COÛTS DE LA MAÎTRISE DE LA RIVIÈRE

a) Maîtrise de la rivière pendant les travaux

Une grande partie des coûts est souvent due à la fixation traditionnelle d'une période de retour de 20 à 50 ans pour les crues de chantier, alors qu'actuellement :

- souvent le corps du barrage peut être réalisé en quelques mois entre deux saisons de crues (la grande majorité des barrages ne nécessite qu'un faible volume de matériaux),

- la submersion des barrages en terre ou en enrochement cause peu de dommages tant que l'ouvrage ne dépasse guère le niveau de la rivière (cependant, le coût du nettoyage après submersion peut être important),

— In homogeneous earth or zoned dams with earth core, the designer, for the sake of safety, usually aims at infinitesimally small leakage, nearly always less than 1 l/s, representing less than 10^{-7} m/s permeability for a 10 000 m² dam with usual cross section. Thus it is usually safety, not economics that sets the permeability limits for this type of dam.

— Rockfill dams with upstream facings can often tolerate several hundred litres per second and this is also true of concrete and RCC dams for which questions of appearance of the downstream face then come into play, usually leading to considerable expenditure to reduce leakage with no justification in terms of safety or economics.

c) *Cost of watertightness*

Aside from its direct cost, the provision of watertightness often affects substantially unit costs for the whole dam, to prevent core cracking in embankment dams or staining on the downstream face of concrete dams.

To summarise, the acceptable level of permeability of a dam can be set :

— by economics, with permeabilities generally between 10^{-6} and 10^{-7} m/s for small storage dams and frequently up to 10^{-5} to 10^{-6} m/s for hydro power dams and large storage reservoirs,

— by appearance, as is often the case at concrete dams,

— by safety, this is usually the case with earth dams where the aim is a permeability of less than 10^{-7} m/s.

But specifying very low leakage rates for other dams (concrete, RCC, hardfill, rockfill with facing), is not always necessary in terms of safety and may lead to the choice of more expensive and/or less safe solutions or to unjustified extra costs.

3.4. COST OF RIVER CONTROL

a) *River control during construction*

Much of the cost of controlling the river during construction arises from the habit of setting a 20 to 50 year return period for the flood, whereas in fact, at present:

- dam body can often be built in a few months before the next flood season (the volume of most of dams is moderate),

- the overtopping of earth and rockfill dams causes little damage so long as they have not exceeded natural river level (however, cost of cleaning up should not be underestimated),

- la submersion des chantiers de barrages en béton ou des batardeaux en béton pose rarement des problèmes graves. On peut parfois prendre le risque d'une submersion annuelle,
- dans la plupart des cas, la durée des submersions est très courte.

On peut souvent obtenir l'économie maximale en laissant à l'Entrepreneur le choix des solutions et l'essentiel du risque correspondant, à condition que le délai d'exécution soit garanti, et sous réserve de vérifier les risques éventuels pour l'ouvrage ou les populations en aval. Ces risques ne peuvent généralement résulter que :

- de la submersion d'usines électriques en cours d'équipement, mais on peut souvent placer ces usines en dehors du lit de la rivière,
- de la submersion des batardeaux de grande hauteur, mais il est généralement possible maintenant de les réaliser en « remblai dur » économique et pouvant supporter sans risques la submersion,
- du déversement avec une forte dénivelée sur les barrages en remblai : s'il est souvent possible de protéger les barrages en enrochement, il est nécessaire de dimensionner largement les dérivations pour les barrages en terre, et pour des périodes de retour de crues de 100 ans ou même 1 000 ans.

b) *Maîtrise définitive de la rivière : déversoirs*

C'est un problème essentiel :

- en matière de coût, car ils représentent en moyenne près de 20 % des coûts globaux (voir chapitre 3.1),
- en termes de sécurité, car la destruction d'ouvrages en remblai par le déversement représente maintenant le risque principal de rupture de barrage, et l'incertitude sur l'appréciation des crues maximales conduit, soit à un défaut de sécurité, soit à un investissement trop important.

Les ouvrages vannés représentent dans le monde de l'ordre de 10 000 barrages ; on compte 5 ruptures dues au non fonctionnement des vannes en dix ans, soit un accident pour $\frac{10\ 000 \times 10}{5}$ = un pour 20 000 barrages × années, ce qui est élevé.

Ces accidents peuvent survenir pour des crues *très inférieures* à la crue de projet. Ce risque est d'autant plus choquant que la crue maximale pendant la vie d'un barrage ne nécessite généralement que l'ouverture du tiers ou de la moitié des vannes.

Les ouvrages non vannés qui représentent environ 20 000 « grands barrages » (et des centaines de milliers de barrages d'une dizaine de mètres de hauteur) sont équipés de seuils déversants libres permettant d'évacuer des crues pouvant varier de quelques dizaines à quelques milliers de m³/s correspondant à une lame d'eau d'une hauteur généralement supérieure à un mètre et en moyenne de 2 à 3 mètres, parfois beaucoup plus.

Il en résulte une réduction de capacité utile qui représente globalement près de 100 milliards de m³ ; et comme il s'agit le plus souvent d'ouvrages de stockage d'eau, notamment pour l'irrigation, ces seuils libres représentent une perte considérable, notamment dans le domaine agricole. La perte correspondante se cumule avec celle

- flooding of partially completed concrete dams or concrete cofferdams rarely causes serious problems; one can even sometimes accept the risk of annual submersion,
- in most cases, the site is flooded for only a very short time.

Maximum economy can frequently be obtained by allowing the contractor to choose his own arrangements and shoulder most of the attendant risk (provided that completion time is guaranteed and subject to checking the risks to the permanent works and downstream population). Such risks only usually arise from:

- flooding of power houses during installation of the plant, but they can often be sited away from the river channel,
- overtopping of high cofferdams, but they can now usually be built of cheap “hardfill” capable of withstanding the overflowing water,
- a high head overflowing embankment dams; although rockfill dams can often be protected, diversion works must be of ample size for earth dams and sometimes designed for 100-year or even 1 000-year floods.

b) *Permanent river control: spillways*

The spillway is a crucial factor in terms of:

- cost, since it represents on average nearly 20 per cent of the project cost (see section 3.1.),
- safety, because destruction of embankment dams from overtopping is nowadays the main dam failure risk, and uncertainty in estimating the maximum flood can either jeopardize safety or push up capital cost.

Gated spillways are found at about 10 000 dams throughout the world, and there have been five failures from non-operation of the gates in ten years, an accident rate of one per $(10\ 000 \times 10)/5 =$ one per 20 000 dam-years: a high figure.

Such accidents can occur with floods that *are much smaller* than the design flood. The risk is all the more shocking in that the largest flood experienced by the dam in its lifetime usually only requires opening one-third or half the gates.

Ungated structures, representing about 20 000 large dams (and hundreds of thousands of others around ten metres high) have uncontrolled overspill sills capable of discharging floods from a few tens to a few thousands cubic metres per second with a head on the sill usually higher than a metre, 2-3 metres on average, sometimes much more.

The storage lost in this way throughout the world represents in total nearly one hundred billion cubic metres and, since these dams are usually designed for storage, mostly for irrigation purposes, uncontrolled spillways account for a considerable loss, to the agricultural community in particular. This is in addition to the loss represent-

qui résulte de la marge prise pour mettre la crête du barrage à l'abri des vagues (cette perte de volume utile des barrages à seuil libre permet cependant souvent un écrêtement substantiel des crues en aval).

3.5. OBSERVATIONS DIVERSES LIÉES AUX COÛTS

Un gain de délai sur l'exécution permet, à coût technique et qualité identiques, une économie réelle de l'ordre de 0,5 %/mois en frais financiers, mais près de 1 % si le gain se porte sur la période d'achèvement des ouvrages. Par contre, un gain ou une perte de temps à l'origine a peu d'influence sur les coûts réels.

Une économie pendant la construction, placée à cinq pour cent d'intérêt réel (coût bancaire moins inflation), permet cinquante ans plus tard un volume de travaux dix fois supérieur. On peut donc admettre le risque de dépenses d'entretien et/ou de perte de puissance à long terme, s'il en résulte une économie importante sur la construction sans influence sur la sécurité. De même, admettre le risque de dégâts modérés pour des crues exceptionnelles peut permettre des économies d'investissement très importantes et un bilan global très amélioré.

Mais cette optimisation économique est souvent difficile parce que les sources de financement pour la construction et l'entretien sont différentes.

ed by the extra height added to the crest to prevent waves splashing over (this loss of storage for ungated structures is however often a way to reduce flood peak downstream).

3.5. SUNDRY REMARKS ON COSTS

For a given design cost and for same quality, shortening construction time produces a real saving of the order of 0.5 per cent per month on interest, rising to nearly 1 per cent if time is saved at the end of the job. In contrast, faster or slower progress at the start has little impact on real costs.

A saving made during construction and invested at five per cent real interest (i.e. after allowing for inflation) will pay for ten times more construction work fifty years later. We can therefore accept some risk of expenditure on maintenance and/or loss of power in the longer term if this means making a large saving on construction cost without jeopardising safety. By the same token, accepting a risk of moderate damage from exceptional floods can offer very substantial capital cost savings and a greatly improved benefit ratio.

But this economical optimization is often difficult as financing sources are not the same for construction and maintenance.

4. POSSIBILITÉS D'ÉVOLUTION DES PROJETS DE BARRAGES

S'il existe de nombreuses raisons économiques justifiant l'évolution des projets, il serait utopique de chercher à dresser un catalogue exhaustif de ce que pourraient être les barrages dans dix ou vingt ans ; en effet, l'imagination des projeteurs et des entrepreneurs et l'apparition dans l'avenir de moyens et de matériaux nouveaux ouvriront des possibilités qu'il est difficile d'apprécier aujourd'hui. Par ailleurs, *l'évolution souhaitable ne se produira que si elle est encouragée et non freinée par les procédures de décision*. On cherchera seulement ci-dessous :

- à évaluer les orientations les plus prometteuses dans la recherche d'économies,
- à définir des possibilités d'évolution dans le contrôle des crues,
- à montrer la possibilité de solutions inusuelles, mais réalistes, qui sont présentées en Annexe.

4.1. ORIENTATIONS POUR LA RECHERCHE D'ÉCONOMIES

(l'importance de l'économie peut varier beaucoup selon les pays et les sites).

a) *Optimisation dans le choix des matériaux*

Une appréciation plus précise des rapports qualité/prix devrait conduire :

- au développement accru de l'usage de l'enrochement, même de qualité moyenne ou médiocre, en remplacement des remblais de sols fins,
- au développement des « remblais durs » économiques, sans spécifications coûteuses liées à une recherche d'étanchéité inutile,
- à un emploi accru de l'acier, des géotextiles, parois moulées, etc.

b) *Combinaison nouvelle de matériaux dans le corps des ouvrages*

L'association de matériaux rigides (béton compacté, « remblai dur », béton armé, maçonnerie, etc) avec des remblais pouvant avoir un rôle mécanique ou un simple rôle de lest devrait permettre des solutions très attractives dont quelques exemples sont donnés plus loin.

c) *Évolution du traitement des fondations*

— Il est maintenant possible, dans beaucoup de cas, d'étancher à la fois une digue et sa fondation par parois moulées exécutées depuis le sommet de la digue. Les progrès économiques et techniques (profondeur, précision, garantie d'étanchéité, traversée d'éboulis et de rochers), le grand choix possible de matériaux de remplissage ou des écrans incorporés, permettent une adaptation optimisée dans les différents cas. Cette solution, utilisée actuellement surtout en réparation, peut conduire à de grandes économies globales dans la construction des futurs barrages de hauteur

4. OPPORTUNITIES FOR CHANGE IN DAM ENGINEERING

While there are many economic reasons for envisaging changes in dam engineering practice, it would be unreasonable to attempt to draw up an exhaustive catalogue of where dams might be in ten or twenty years time. Designers' and contractors' imagination and the appearance of new materials, plant, machinery and tools in the future will open up new opportunities that can hardly be assessed today. Furthermore, *desirable change will only come about if it is encouraged and not slowed by decision-making procedures*. Our objectives in this Chapter will be to:

- evaluate the most promising trends in pursuing cost savings,
- review opportunities for change in flood control,
- present the possibility of unusual but realistic designs which are described in the Appendix.

4.1. COST-SAVING OPTIONS (size of savings may differ widely according to countries and dam sites)

a) *Optimisation in materials selection*

A more refined assessment of quality/cost ratios should lead to:

- greater use of rockfill, even of moderate or poor quality, as a substitute for earthfill,
- development of cheap hardfill without costly specifications to attain unnecessarily low permeabilities and high strength,
- greater use of steel, geotextiles, diaphragm walls, etc.

b) *New combinations of materials in dam body*

Combining stiff materials (RCC, hardfill, reinforced concrete, masonry, etc.) with fill which may provide mechanical strength or just weight, might offer very attractive solutions, a few examples of which are discussed later.

c) *New approach to foundation treatment*

— It is now often feasible to control seepage through an embankment dam and its foundation at one stroke, by sinking a diaphragm wall from the dam crest. Improved costs and techniques (depth, precision, reliable watertightness, machinery for passing rock or boulders, wide choice of wall materials with or without incorporated cutoffs), enables the design to be optimised for each application. Although currently used chiefly for repairs, the technique could offer major savings on the total project

modérée. Il faut cependant vérifier que le barrage ne court pas de risques avant achèvement de la paroi.

— La consolidation en place de terrains meubles, par mélanges mécaniques ou hydrodynamiques avec un liant d'apport (deep mixing, jet grouting, jet mix), offre de grandes possibilités pour éviter les risques de liquéfaction ou d'érosion et améliore la cohésion des fondations.

d) *Une philosophie différente de l'étanchéité*

Le coût indirect de l'étanchéité est généralement élevé pour les barrages en remblai parce que l'on impose à tout le barrage des spécifications coûteuses, principalement pour éviter tout mouvement important préjudiciable à l'étanchéité. Des projets comportant des étanchéités très souples (acier, matériaux bitumineux, PVC, etc.) peuvent permettre de beaucoup réduire les spécifications et les coûts correspondants des remblais.

Le coût indirect de l'étanchéité pour les bétons est également très élevé car elle est la cause réelle d'une qualité excessive et coûteuse des bétons, qui résulte généralement de la crainte de traces de fuites sur le parement aval.

D'une manière générale, il sera souvent possible, dans l'avenir, d'accepter le risque de fuites non négligeables si cela permet de choisir des types d'ouvrages aussi sûrs et globalement plus économiques.

Enfin, dans le cas où des fuites très importantes sont économiquement admissibles, des ouvrages en enrochement sans noyau ni masque, comportant simplement des zones de perméabilités croissantes de l'amont vers l'aval, peuvent être des solutions très économiques pour le corps du barrage et les dépenses annexes (excavations, traitement de la fondation, contrôle de la rivière pendant la construction).

4.2. MAÎTRISE PROVISOIRE OU DÉFINITIVE DES CRUES

En moyenne, les coûts totaux directs et indirects (tranche d'eau perdue, frais d'exploitation, etc.) correspondant à cette maîtrise représentent *de l'ordre du tiers des investissements totaux*. C'est un des domaines où les possibilités de progrès économiques et de sécurité sont les plus importantes ; ces progrès devraient notamment prendre en compte les données ci-dessous.

- Généralement, les débits réels probables ne dépassent que quelques heures par siècle 30 % du débit de la crue de projet.
- Une route sur un barrage est souvent inutile, son positionnement fréquent sur la crête élimine de nombreuses solutions attractives pour la maîtrise des crues.

Les économies pourraient porter notamment sur les points suivants :

a) *Barrages en enrochement*

Le déversement sur le barrage pendant la construction ou l'exploitation peut permettre des économies considérables et une augmentation de sécurité, à condition de bien adapter la solution aux débits spécifiques et de ne pas se fier uniquement à la théorie ou au modèle réduit. Des solutions réalistes paraissent possibles dans la plupart des cas ; des exemples sont donnés ci-après (coursier en béton ou béton compacté).

cost of future dams of moderate height. Care should be taken that dam is not at risk before completion of the diaphragm wall.

— In situ improvement of soil by mixing it in place (mechanically or hydrodynamically) with a binder (deep mixing, jet grouting, jet mix) offers great opportunities for combating potential liquefaction or erosion and improving foundation cohesion or rigidity.

d) *Different philosophy on watertightness*

Watertightness usually has a considerable indirect impact on embankment dam costs because the whole structure is subject to costly specifications aiming primarily at preventing any large movements which might cause leakage. Designs in which the impervious component is flexible (steel, bituminous materials, PVC, etc.) would enable these specifications to be relaxed and the corresponding cost of the fill to be reduced.

The indirect cost of watertightness on concrete is also very high since it is the true reason for excessively stringent and expensive concrete quality requirements, usually due to fears of stains appearing on the downstream face.

Generally speaking, it will often be possible, in the future, to accept the risk of not inconsiderable leakage if this means choosing equally safe and more economical (in total cost) dam types.

Lastly, if very high leakage is acceptable economically, rockfill dams without core or facing but incorporating zones of different permeability, increasing in the upstream-downstream direction, might provide very cheap solutions for the dam body and ancillary works (excavation, foundation treatment, river control during construction, etc.).

4.2. TEMPORARY AND PERMANENT FLOOD CONTROL

In average figures, the direct and indirect (lost storage, operating costs, etc.) costs of temporary and permanent flood control represent something of the order of *one-third of total capital cost*. This is an area with the greatest opportunities for improving costs and safety; the following facts must be considered in this light:

- in general, actual river flow does not exceed 30 per cent of the design flood except for a few hours per century.
- a road across the dam is often unnecessary, and placing it on the crest, as is usually done, eliminates many attractive alternatives for flood control.

Savings might be found in the following areas:

a) *Rockfill dams*

Designing the dam to withstand overtopping during construction or after completion might produce considerable savings and improve safety, provided arrangements are well based on specific flow rates per unit length and reliance is not put solely on theory or scale model testing. Realistic solutions seem feasible in most cases, and examples are given in the Appendix (concrete or RCC chute spillways).

La plupart des solutions décrites au chapitre 5 peuvent être adaptées pour admettre le déversement en cours de travaux.

b) *Barrages en remblai meuble*

Lorsqu'un barrage en remblai déversant est constitué d'enrochement, au moins dans sa partie aval sous le revêtement de protection, les fuites éventuelles à travers cette protection peuvent être drainées dans le massif d'enrochement. Il n'en est pas de même si le massif aval n'est pas fortement drainant, une fuite sous le revêtement de protection pouvant entraîner des désordres dangereux ; une telle solution nécessite donc des précautions extrêmes : l'utilisation de béton armé continu, ou de grandes dalles disposées en tuiles, peut constituer une solution pour des barrages de hauteur modérée.

c) *Barrages en béton ou en remblai dur*

On prévoit souvent le déversement sur le corps du barrage, mais en se limitant à la partie centrale. Il peut être souvent économique, pour les barrages non vannés, d'admettre un déversement exceptionnel sur les rives afin de réduire la hauteur de la tranche d'eau perdue en augmentant la longueur de déversement.

d) *Barrages vannés*

Remplacer la moitié des vannes classiques par des hausses fusibles destructibles progressivement, soit volontairement, soit pour un niveau d'eau prédéterminé correspondant à des crues exceptionnelles, permet de réduire substantiellement l'investissement et d'améliorer la sécurité réelle.

e) *Seuils libres*

La tranche d'eau perdue représente pour beaucoup d'ouvrages existants une part importante du volume utile, et *pour l'ensemble du monde près d'une centaine de milliards de m³ d'eau*, correspondant à des dizaines de millions d'hectares irrigables.

Il paraît possible de récupérer l'essentiel de cette tranche perdue :

- soit par l'emploi de vannes gonflables,
- soit par des éléments indépendants, submersibles sans dommage pour les crues modérées, et fusibles pour les crues exceptionnelles (à partir de la crue centennale, par exemple).

Les deux solutions ci-dessus permettent également, tout en augmentant de fait la retenue utile, de baisser le niveau du seuil en béton en augmentant ainsi le débit de la crue de projet et donc la sécurité. Ces deux solutions peuvent s'appliquer également aux barrages futurs, de même que la solution de seuils labyrinthe (voir Rapports 15 et 24 de la Q59 du Congrès de Lausanne).

f) *Contre-barrages*

L'utilisation de « remblai dur » peut permettre la construction économique de contre-barrages submersibles, créant une fosse d'amortissement peu coûteuse pour les déversoirs importants.

Most of the designs described in the chapter 5 can be used to allow overtopping during construction.

b) *Earth dams*

When an overspill embankment dam is made of rockfill with protection on the downstream side, any leakage through this protection can drain away through the rockfill. This is not the case if the downstream shoulder is not free-draining and any leakage through the protection may cause serious distress, thus requiring extreme care in this protection: utilisation of continuously reinforced slab spillways or large slabs set tilewise may be a solution for dams of moderate height.

c) *Concrete and hardfill dams*

In these types of dam, the overspill section is confined to the midpart of the length. At ungated dams, it might be economical to tolerate exceptional overspilling at the abutments in order to increase the length of spillways and consequently the normal level of reservoir.

d) *Gated dams*

Replacing half the usual gates by flashboards or fusegates which are destroyed when required or automatically washed away when the headwater reaches a predetermined level (corresponding to exceptional floods) would substantially reduce capital cost and improve true safety.

e) *Uncontrolled overspills*

Lost capacity at existing reservoirs controlled by ungated spillways represents a good proportion of live storage. *In the world as a whole, it amounts to nearly one hundred billion cubic metres of water*, enough to irrigate more than ten million hectares of land. It would seem possible to recover most of this lost capacity by:

- fitting inflatable weirs at the crest,
- fitting independent fusegates designed to be overtopped by moderate floods, some of them being washed away by exceptional floods and all by design flood.

While increasing actually live capacity, these two arrangements would, when necessary, enable the concrete spillway sill to be lowered to increase discharge capacity and thereby improve safety. These two solutions may also apply to future dams, as well as labyrinth weirs (cf Q 59, R15 and R24, Lausanne Congress).

f) *Afterbay dams*

Hardfill could be used to build cheap overspill afterbay dams to impound a cheap plunge pool below large spillways.

g) *Dispositifs anti-vagues*

La marge nécessaire pour tenir compte des vagues représente une réduction importante du stockage utile (souvent 5 à 10 %). Divers dispositifs de murs ou de collecteurs situés en crête de barrage, ou légèrement en amont, peuvent être intéressants sur le plan de l'économie comme sur celui de la sécurité pour les barrages en terre ou en enrochement.

4.3. EXEMPLES D'OUVRAGES OU DISPOSITIONS NON CLASSIQUES

Il peut y avoir beaucoup de projets nouveaux résultant de l'évolution des projets actuels avec des adaptations mineures ou des nouveaux matériaux (géotextiles..), mais on ne décrira ci-après que quelques solutions qui découlent logiquement des considérations précédentes : elles seront comparées aux projets classiques dans le Chapitre 5 et décrites en Annexe.

Ces ouvrages sont basés sur les sept dispositions suivantes :

- A - Profils inusuels de barrages poids en remblai dur
- B - Barrages associant des structures poids en remblai dur avec des remblais divers
 - B1 : remblai dur en aval
 - B2 : noyau en remblai dur
- C - Voûtes multiples verticales en béton armé chargé par du remblai
- D - Utilisation d'étanchéité acier pour :
 - D1 : barrages en remblai dur
 - D2 : barrages en terre
 - D3 : barrages en enrochement
- E - Barrages zonés horizontalement
 - E1 : associant remblai dur et enrochement
 - E2 : associant enrochement et remblai en sol fin
- F - Barrages en enrochement déversant par utilisation de béton compacté
 - F1 : remblai dur en gradins
 - F2 : mur en remblai dur
- G - Barrages perméables en enrochement pour maîtrise des crues

Plusieurs combinaisons des ouvrages types ci-dessus sont envisageables.

* *
*

La réalisation de telles solutions nécessite naturellement des études détaillées dans chaque cas, notamment pour les caractéristiques des matériaux, les calculs de stabilité, perméabilité et entretien, les conditions aux limites entre matériaux rigides et remblais.

g) *Wave protection*

The freeboard needed for wave control represents an important reduction in live storage (often 5-10 per cent). Various types of wave parapets or interceptors at or slightly upstream of the dam crest might be attractive as regards both economics and safety for earth or rockfill dams.

4.3. EXAMPLES OF UNCONVENTIONAL DESIGNS

Many new designs might evolve from today's design with minor modifications or with the appearance of new inventions (like geotextiles, etc.) but the descriptions below concern some structures that emerge logically from the foregoing considerations; they are compared with their conventional counterparts in Chapter 5 and described in the Appendix.

These structures are based upon seven basic arrangements:

- A - Unusual cross sections for gravity dams when using hardfill
- B - Dam combining hardfill gravity structures with earthfill and/or random fill
 - B1: hardfill downstream
 - B2: hardfill core
- C - Reinforced concrete vertical multiple arches weighted by random fill
- D - Steel watertight facings for:
 - D1: hardfill dams
 - D2: earthfill dams
 - D3: rockfill dams
- E - Horizontally zoned dams
 - E1: combined hardfill and rockfill,
 - E2: combined rockfill and earthfill
- F - Overspill rockfill dams using RCC
 - F1: stepped hardfill
 - F2: hardfill wall
- G - Pervious rockfill dams for flood control

Several combinations of the above typical structures are possible.

* *
*

Implementation of such structure requires careful detailed studies in each case, particularly with regard to materials, boundary properties, structural stability analysis, permeability and maintenance.

Tableau 5
 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SOLUTIONS DÉCRITES EN ANNEXE

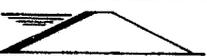
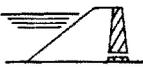
CATEGORIES	SOLUTIONS	CROQUIS TYPE	DESCRIPTION SOMMAIRE	DEVERSEMENT
Barrages gravitaires en remblai dur	A		Profils inusuels de barrages en remblai dur	X
Barrages poids associant remblai dur avec remblais divers	B1		Remblai dur en aval	X
	B2		Noyau en remblai dur	Non
Voûtes multiples verticales en béton armé chargé par du remblai	C			déversement possible
Utilisation d'étanchéité acier pour	D1		Remblai dur	X
	D2		Terre	Non
	D3		Enrochement	adaptation possible F1,F2
Barrages zonés horizontalement	E1		Remblai dur et enrochement	adaptation possible F1
	E2		Enrochement et remblai sol fin	Non
Barrages en enrochement déversant par utilisation de béton compacté	F1		Remblai dur en gradins	X
	F2		Mur en remblai dur	X
Barrages perméables en enrochement pour contrôle des crues	G			Non

Table 5
SUMMARY OF ALTERNATIVES DESCRIBED IN APPENDIX

CATEGORY	EXAMPLES	TYPICAL SKETCH	BRIEF DESCRIPTION	OVERSPILL
Hardfill dams	A		Hardfill with unusual cross section	X
Weighted hardfill dams	B1		Hardfill and upstream random fill	X
	B2		Fill dam with hardfill core	No
Weighted reinforced concrete dams	C			possibly adapted for spilling
Steel water-tightness used for	D1		Hardfill dams	X
	D2		Earthfill	No
	D3		Rockfill	possibly adapted F1, F2
Horizontally zoned dams	E1		Hardfill and Rockfill	possibly adapted F1
	E2		Rockfill and Earthfill	No
Overspill rockfill dams	F1		Rockfill with downstream hardfill stepped lining	X
	F2		Rockfill dam with overspill hardfill wall	X
Rockfill pervious dams	G			No

5. COMPARAISONS ENTRE OUVRAGES(*)

Les ouvrages classiques les plus utilisés récemment (voir chapitre 3.1.) seront comparés ci-dessous, sur le plan économique, entre eux et avec des solutions innovantes dont certaines sont décrites au chapitre 4 et en Annexe.

La première partie de ce chapitre concerne les pays où le coût de la main-d'œuvre est élevé (de 5 à 25 US\$/heure). Certaines solutions non classiques intéressantes pour ces pays le sont aussi pour les pays à faible coût de main-d'œuvre, mais dans ces derniers d'autres solutions paraissent également attractives, notamment pour des réalisations peu ou pas mécanisées.

Dans tous les cas, le choix doit être basé sur une étude précise par des projeteurs expérimentés, et doit notamment tenir largement compte des conditions de fondation. Il doit également prendre en compte tous les coûts d'entretien qu'il peut être plus difficile d'apprécier pour des solutions innovantes.

5.1. COMPARAISON POUR LES PAYS A COÛT DE MAIN-D'ŒUVRE ÉLEVÉ

La comparaison est faite séparément pour les ouvrages de plus de 100 mètres de hauteur maximale, les ouvrages dont la hauteur est comprise entre 30 et 100 mètres et les ouvrages de moins de 30 mètres de hauteur.

L'objectif n'étant que d'identifier les solutions les plus économiques et l'ordre de grandeur de l'économie possible, on recherche davantage la clarté de la comparaison que sa précision et on limite l'étude aux ouvrages classiques les plus usuels pour chaque tranche de hauteur ; certains calculs justifiant les comparaisons pour les ouvrages les plus courants sont donnés en Annexe.

5.1.1. Ouvrages de plus de 100 mètres de hauteur

Ils ne représentent en nombre qu'environ 5 % des « grands barrages » récents des pays industrialisés, mais plus de 40 % en valeur.

Les 3/4 de ces ouvrages sont fondés intégralement au rocher, 15 % ont un déversoir d'une capacité supérieure à 10 000 m³/s, 60 % un déversoir compris entre 1 000 et 10 000 m³/s(*). Les déversoirs ne sont vannés que dans 50 % des cas.

a) *Barrages en remblai fin*

Ils représentent encore plus de 20 % des très grands barrages achevés entre 1983 et 1986, c'est-à-dire étudiés avant 1980. Ils ne représentent plus que 10 % des très grands barrages en projet ou en construction, car ils sont de plus en plus souvent remplacés par des ouvrages au moins partiellement en enrochement, souvent moins

(*) Les chiffres cités dans ce chapitre correspondent aux ouvrages achevés entre 1983 et 1986.

5. COMPARISONS BETWEEN DESIGNS(*)

The most common types of recent conventional designs (see section 3.1.) are compared in terms of cost between themselves and with innovative solutions (of which some are described hereabove and in the Appendix).

The first part of this chapter concerns countries with high labour costs (\$US 5-25 per hour). Some unconventional designs that would be attractive for these countries would also hold promise for those with cheap labour, but in the latter case there are even more benefits from other alternatives, especially those requiring little mechanisation of construction.

In all cases, the choice should be based upon careful study by experienced engineers with great care on the quality of the foundation. This choice should also take in account all costs of maintenance, of which evaluation may be more difficult for innovative solutions.

5.1. COMPARISONS FOR COUNTRIES WITH HIGH LABOUR COSTS

The comparisons are made separately for dams over 100 m high, those between 30 and 100 m, and those less than 30 m high.

Since our purpose is simply to identify cheaper alternatives and an order of magnitude of the possible saving, efforts will focus on making clear, rather than very accurate comparisons, and only the most common types of dam will be examined for each height range. Some calculations justifying these comparisons appear in the Appendix.

5.1.1. Dams over 100 m

Dams more than 100 m high represent only about 5 per cent of the number of "large dams" recently built in the industrialized countries but more than 40 per cent in value.

Three-quarters of this number have a 100 % rock foundation, 15 per cent have a spillway with a capacity in excess of 10 000 m³/s, and 60 per cent have a spillway capacity of 1 000-10 000 m³/s(*). Spillways are gated at 50 % of these dams.

a) *Earth dams*

Earth dams represent more than 20 per cent of the very high dams built between 1983 and 1986, i.e. designed before 1980.

They now represent only 10 per cent of very high dams being designed or built today since they have most frequently been superseded by designs based at least par-

(*) Figures in this chapter refer to projects completed between 1983 and 1986.

coûteux et plus sûrs. Les solutions comparées ci-dessous aux barrages en enrochement sont donc applicables, avec une économie encore plus importante.

b) *Barrages en enrochement*

Ils représentent environ la moitié des très grands barrages récents ou en construction.

L'évolution pour des raisons économiques pourra être axée, en particulier, sur les points suivants :

- remplacement des barrages à noyau par des barrages à masque. Cette tendance, déjà générale avec masque en béton armé lorsqu'il n'y a pas de risque de tassements, pourrait aussi s'étendre par l'emploi de masques en acier peu sensibles aux tassements ; leur surcoût par rapport au béton armé est négligeable pour cette taille d'ouvrage,

- emploi du béton compacté comme revêtement aval partiel pour le passage des crues pendant les travaux,

- adaptation des spécifications pour réduire la taille des enrochements et permettre leur transport par tapis, éventuellement après tri ou après concassage : cette solution peut être économiquement justifiée pour ces ouvrages qui nécessitent de l'ordre de 10 millions de m³ (cadence de plus de 2 000 t/heure) et pour faciliter le zonage,

- réalisation en remblai dur de la partie supérieure (20 ou 30 mètres) des barrages à masque (solution E1 en Annexe), qui permet une économie de l'ordre de 20 % sur l'ensemble de l'ouvrage ainsi qu'un gain de délai important, le tonnage à transporter étant réduit de 30 % (calcul en Annexe),

- emploi de voûtes à double courbure dans les vallées étroites en rocher de bonne qualité,

- surhauteur pour réduire l'importance du déversoir.

L'économie envisageable pour les barrages en enrochement de grande hauteur est donc probablement supérieure à 20 % si l'on tient compte de ces diverses possibilités.

c) *Barrages-poids traditionnels*

Ils représentent encore près de 25 % des très grands barrages récents. Les considérations économiques permettent de prévoir leur remplacement quasi total à terme par :

- des barrages-poids ou poids arqués en béton compacté ou en remblai dur avec masque (solution D1), beaucoup plus économiques,

- des barrages en enrochement à masque avec éventuellement variante (E1) lorsque le débit de l'évacuateur n'est pas très élevé,

- des barrages-voûtes dans les vallées étroites en bon rocher, surtout lorsque les crues sont très importantes.

Dans la plupart des cas, l'une au moins de ces options devrait conduire à une économie considérable, en comparaison avec les barrages-poids classiques.

tially on rockfill, which is often cheaper and safer. This means that the savings might be even greater than on the comparisons examined below.

b) *Rockfill dams*

Rockfill dams account for half the very high dams recently completed or in the course of construction.

Cost-driven changes might focus chiefly on the following points:

- Substitution of watertight upstream facing for internal core. This trend which has become common practice for reinforced concrete facings when settlement is not a problem, might also be extended to steel facings, easier to adapt to important settlement. The extra cost of steel as compared with reinforced concrete is negligible for large dams.

- Partial RCC downstream facing to permit spilling floods during construction.

- Amended specifications to reduce rockfill size and enable it to be transported by belt conveyor, combined with sorting or crushing as necessary. This might be economically justified in dams requiring something like 10 million cubic metres of fill (with a placement rate of more than 2 000 t/hour) and would reduce the zoning problem.

- Hardfill replacing the top 20-30 m of rockfill dams with upstream facing (alternative E1 in Appendix), which would represent a saving of about 20 per cent on total cost and substantially shorten construction time, since the tonnage to be transported would be 30 per cent less (see calculations in Appendix).

- In narrow valleys in sound rock, double curvature arch dams can be preferable.

- Heightening dam to reduce spillway capacity.

Conceivable saving on very high rockfill dams would thus probably be greater than 20 per cent if all the opportunities are considered.

c) *Conventional gravity dams*

Such gravity dams still account for nearly 25 per cent of recent very high dams. Cost incentives would indicate that they might eventually be completely replaced by:

- straight-crested or arched gravity dams built with roller compacted concrete or hardfill with upstream facing (alternative D1) at much lower cost,

- rockfill dams with upstream facings (and possibly alternative E1) when spillway capacity is moderate,

- arch dams in narrow valleys in sound rock, especially when floods are very large.

In most cases, at least one of these alternatives should produce very substantial savings as compared with conventional gravity dams.

d) *Barrages-voûtes*

Ils représentent près de 20 % des grands barrages récents de plus de 100 mètres et 50 % des barrages existants de plus de 170 mètres.

Leur nombre pourrait se maintenir ou se développer pour les vallées étroites en bon rocher. En effet, le volume de béton d'une voûte peut descendre à moins du tiers d'un barrage gravité en remblai dur et moins du dixième d'un barrage en enrochement pénalisé aussi par le coût plus élevé de l'évacuateur. Le coût des barrages-voûtes classiques pourrait d'ailleurs être abaissé par l'emploi du béton compacté de qualité (exemple japonais), par une meilleure optimisation des déversoirs et par l'acceptation du passage des crues les plus importantes à travers la voûte ou sur la voûte pendant le chantier. L'intérêt économique des très grands barrages-voûtes dans des vallées étroites est tel que leur emploi pourrait s'étendre à des pays où cette solution n'est pas encore utilisée.

Mais, pour des vallées larges, la voûte peut dans le futur être remplacée par un barrage-poids ou poids arqué en remblai dur avec masque ou, si le débit d'évacuation n'est pas très élevé, par un barrage en enrochement.

e) *Évolution générale*

Les considérations ci-dessus conduisent à envisager, pour les très grands ouvrages futurs, une préférence pour l'emploi des ouvrages suivants :

- barrages en enrochement à masque (éventuellement avec crête en remblai dur),
- barrages-poids ou poids arqué en remblai dur avec masque,
- barrages-voûtes,

ces derniers pour les vallées relativement étroites et en bon rocher. Dans les autres cas, le choix entre les deux premières solutions peut être souvent difficile.

Dans le cas de fondation non rocheuse (25 % des cas), la solution de barrage en enrochement à noyau ou à masque paraît la plus attractive (possibilité des solutions E1 ou E2).

5.1.2. Barrages de 30 à 100 mètres de hauteur

Ils représentent environ 40 % en nombre et en valeur des grands barrages des pays industrialisés.

a) *Barrages en terre*

Ils représentent près de la moitié en nombre et 40 % en valeur des barrages de cette catégorie, leur emploi décroissant lorsque la hauteur augmente. Un tiers seulement de ces ouvrages est fondé entièrement au rocher, 60 % ont une capacité de déversoir inférieure à 1 000 m³/s, 15 % inférieure à 100 m³/s.

Les ouvrages non fondés au rocher pourront souvent être avantageusement remplacés par des ouvrages comportant une part d'enrochement, même si le coût unitaire de celui-ci est relativement élevé : par exemple une disposition E2 (partie haute en enrochement) peut conduire généralement à une économie supérieure à 10 %.

d) *Arch dams*

Arch dams represent nearly 20 per cent of recent large dams more than 100 m high and 50 per cent of all dams more than 170 m high.

They might maintain their position or even increase their share in narrow valleys in sound rock, since they may require as little as less than one-third of the concrete for an equivalent hardfill gravity dam, or less than one-tenth of the volume of a rockfill dam, which is also penalised by the higher spillway cost. The cost of conventional arch dams could in fact be reduced by using high quality roller compacted concrete techniques (Japanese RCC practice), by better optimising the spillway arrangement and by accepting that larger floods might flow through or over the dam during the construction period. The cost benefits of very large arch dams in narrow valleys are such that they might be introduced into countries where they were hitherto unknown.

In wide valleys, the arch dam might be superseded in future by straight or arched hardfill gravity dams with upstream facing or, for moderate spillway requirements, rockfill dams.

e) *General trend*

The above considerations would indicate that the following types might be chosen for the very high dams of the future:

- rockfill dams with upstream facing (perhaps with hardfill crest section),
- straight-crested or arched hardfill gravity dams with upstream facing,
- arch dams.

Arch dams would be confined to narrow valleys in sound rock, for other sites the choice between the other two types might often be difficult.

Where a rock foundation is not available (25 per cent of sites), the most attractive option would seem to be a rockfill dam with core or facing (with possible use of alternatives E1 or E2).

5.1.2. Dams 30-100 m high

This height range represents about 40 per cent in number and in value of the large dams in the industrialised countries.

a) *Earth dams*

Earth dams account for half the number and 40 per cent of the value of all dams in this category, the percentage decreasing for higher dams. Only one-third are founded entirely on rock, 60 per cent have a spillway capacity of less than 1 000 m³/s, and 15 per cent, less than 100 m³/s.

Those dams not founded on rock could often be advantageously replaced by structures incorporating some proportion of rockfill, even if its unit cost is relatively high: for example, an arrangement as in alternative E2 (top section rockfill) might in the general case lead to a saving over 10 %.

Dans le cas de fondation rocheuse, il sera souvent plus économique d'utiliser une des alternatives indiquées ci-dessous pour les barrages en enrochement, l'économie pouvant être encore plus importante que pour ceux-ci.

b) *Barrages en enrochement*

Ils représentent environ 30 % en nombre et près de 40 % en valeur des ouvrages récents de cette taille, la proportion augmentant avec la hauteur. 70 % sont fondés entièrement au rocher, près de 60 % ont une capacité d'évacuation inférieure à 1 000 m³/s.

Dans le cas de fondation rocheuse, les barrages en enrochement pourraient souvent être remplacés par l'une ou l'autre des solutions A, D1, E1, F1, F2. La plupart de ces solutions sont basées sur l'utilisation plus ou moins importante de remblai dur en association avec l'enrochement.

Le choix de la solution dépend des prix relatifs du remblai dur et de l'enrochement, de la qualité du rocher, de l'importance du débit spécifique et de la fondation.

Plus de 5 % de ces ouvrages sont destinés uniquement au contrôle des crues, l'utilisation de la solution G : barrage en enrochement non étanche peut alors conduire à une économie très considérable en coût et en temps.

c) *Barrages-poids en béton classique*

Ils représentent 20 % des ouvrages de cette hauteur. 60 % d'entre eux ont une crue de projet inférieure à 1 000 m³/s. Les solutions préconisées ci-dessus pour remplacer les barrages en enrochement fondés au rocher s'appliquent avec une économie encore plus importante.

Un barrage-poids arqué en remblai dur ou une solution F2 (en enrochement à masque avec mur aval en remblai dur) peuvent conduire à des économies très importantes.

Les solutions proposées et incluant du remblai dur peuvent souvent être moins coûteuses que certains barrages-poids en béton compacté réalisés actuellement.

d) *Barrages-voûtes*

Ils ne représentent que 5 % des ouvrages récents de cette hauteur, alors que le pourcentage était beaucoup plus élevé autrefois. Ceci peut simplement résulter du fait que beaucoup de sites favorables à des voûtes sont déjà utilisés depuis longtemps.

La réalisation de voûtes simplifiées, cylindriques ou, lorsqu'on approche de 100 mètres, avec parement aval incliné, conduit, dans les vallées étroites, à un volume dix fois inférieur à celui d'un barrage en enrochement, le gain de volume étant encore plus élevé si les voûtes sont à double courbure. Cette solution peut donc souvent rester économique lorsque la crue de projet est importante et la fondation de bonne qualité.

e) *Résumé*

Dans le cas le plus général d'une fondation rocheuse, l'utilisation de remblai dur souvent en association avec enrochement paraît conduire à des solutions très éco-

With a rock foundation, it would often be more economical to use one of the alternatives to the rockfill dam discussed below, when the saving might be even greater.

b) *Rockfill dams*

Rockfill dams represent about 30 per cent in number and nearly 40 per cent in value of recent projects in the height range, the proportion increasing with height. 70 per cent have a 100 % rock foundation, nearly 60 per cent have a spillway capacity of less than 1 000 m³/s.

With a rock foundation, rockfill dams could be often replaced by one or the other of alternatives A, D1, E1, F1, F2. Most of which are based on the use of some proportion of hardfill with or without rockfill.

The final choice would depend on the relative costs of hardfill and rockfill, rock quality, specific discharge and foundation quality.

More than 5 per cent of these dams are designed solely for flood control, and alternative G (permeable rockfill dam) might offer very considerable savings in time and money.

c) *Conventional concrete gravity dams*

These represent 20 per cent of this height range. 60 per cent have a design flood of less than 1 000 m³/s. The alternatives A, D1, E1, F1, F2 also apply in this case, and the saving would be even greater than in the case of rockfill dams.

An arched hardfill gravity dam or alternative F2 (rockfill with upstream facing and hardfill downstream facing) might save a large part of the cost.

The suggested alternatives using hardfill might frequently be less costly than certain of the RCC dams currently being built.

d) *Arch dams*

Arch dams account for only 5 per cent of recent constructions in this height range, although the percentage was much higher previously. This might simply mean that many of the best arch dams sites have already been developed.

Simplified cylindrical arches or, approaching 100 m in height, with battered downstream face, require less material in narrow valleys than a rockfill dam, by a factor of ten, this factor being higher for double curvature arches. The arch dam may thus be an economical choice in many cases for a large design flood with a good rock foundation.

e) *Summary*

In the general case of a rock foundation, the use of hardfill combined with rockfill would appear to offer very economical designs as compared with conventional types while being much less vulnerable to overtopping than plain embankment dams.

nomiques par rapport aux solutions classiques, tout en étant beaucoup moins vulnérables aux submersions que les ouvrages en remblai.

Beaucoup de ces solutions prévues pour un déversement sur le corps du barrage permettront aussi d'éviter souvent les vannes sans perdre une tranche d'eau importante.

5.1.3. Ouvrages de moins de 30 mètres de hauteur

50 % environ sont fondés au rocher, 25 % ont une fondation totalement meuble, 25 % une fondation mixte. Ces ouvrages seront examinés ci-dessous en fonction de la capacité de l'évacuateur qui peut prendre une part essentielle dans la conception et le coût de l'ouvrage.

a) *Crues de projet inférieures à 100 m³/s*

Ils représentent près de la moitié de ces ouvrages et sont situés en général sur de petits bassins versants ; ils nécessitent des investissements souvent faibles.

Ce sont généralement des ouvrages d'irrigation : les dépenses de reconnaissances, d'études et de contrôle sont en fait réduites, et il existe souvent une très grande incertitude sur l'évaluation de la crue de projet.

Les solutions classiques de barrages en terre peuvent rester intéressantes s'il existe des matériaux convenables à proximité. Si ce n'est pas le cas, l'utilisation d'écran imperméable, de paroi moulée sur l'ensemble fondation et barrage, de géomembranes, peuvent conduire à des solutions intéressantes. Il existe de nombreuses possibilités, mais elles sont trop diverses pour être passées en revue ici. L'emploi de la solution B1 ou B2 peut être intéressant sur de nombreux sites.

b) *Crues de projet de 100 à 1 000 m³/s*

Pour ces ouvrages dont le coût du déversoir est souvent égal ou supérieur au coût de la digue, un barrage déversant en remblai dur remblayé en amont (solution B1) paraît économique dans la plupart des cas, l'économie pouvant atteindre 30 % (voir Annexe).

Cette solution évite les aléas liés à l'hydrologie qui restent souvent très grands pour ces ouvrages et, en déversant sur une grande longueur, permet d'éviter la perte d'une tranche d'eau pouvant dépasser 20 % du volume total des réservoirs actuels. Cette solution peut également être intéressante pour beaucoup d'ouvrages de moins de 15 mètres ; elle dépend peu des matériaux locaux, les volumes de remblais durs nécessaires de l'ordre de quelques milliers ou quelques dizaines de milliers de m³ par ouvrage peuvent souvent être réalisés par les moyens de l'industrie routière.

La réalisation de l'étanchéité à l'amont et l'emploi dans la partie aval de l'ouvrage d'un mur déversant en terre armée peuvent être très économiques (barrage de Taylor Draw réalisé, en 1984, aux États-Unis) et s'appliquer même à des débits de plus de 1 000 m³/s. L'emploi d'autres solutions pour le déversement (gabions en tôle de 4 à 5 mm, palplanches) peut également être intéressant.

Most of these alternatives designed to allow floods to discharge over the dam itself would also enable gates to be dispensed with in many cases, without incurring the loss of a large slice of reservoir capacity at the top.

5.1.3. Dams less than 30 m high

About 50 per cent of dams in this category have a rock foundation, 25 per cent have a soft soil foundation, and the remainder have a mixed foundation. This category is examined in terms of spillway capacity, which may become the most important factor in design and cost.

a) *Design flood less than 100 m³/s*

This class represents nearly half the category and usually control small catchments. Capital cost is usually low.

The purpose is usually irrigation. Expenditure on site investigation, design and supervision is actually moderate and there is usually much uncertainty on the actual size of the design flood.

Conventional earth dam designs may retain their advantages if suitable materials are available nearby. Otherwise, the use of some form of impervious barrier or a diaphragm wall through the dam and foundation or geomembranes may offer attractive alternatives. The possibilities are numerous but too diverse to be reviewed here. Alternatives B1 or B2 might be promising at a number of sites.

b) *Design flood 100-1 000 m³/s*

In this case where the spillway may cost as much as, or more than the dam, a hardfill overspill dam with loose fill on the upstream side (alternative B1) appears attractive under most circumstances, with a possible saving of up to 30 per cent (see Appendix).

It avoids problems arising from uncertainty on the design flood (which is often a major factor with such dams) and, by increasing the length of the overspill, the reduction in storage capacity is less (at the present time, this capacity loss may be more than 20 per cent of total capacity). This alternative might also be attractive for many dams less than 15 m high, it is fairly independent of what materials are available locally and the hardfill needed, ranging from a few thousand to a few tens of thousand cubic metres, could often make use of roadbuilding plant.

Placing the watertight component on the upstream side, and providing a reinforced earth overspill wall on the downstream side might be extremely economical (cf Taylor Draw dam built in the USA, in 1984) and even be suitable for floods of more than 1 000 m³/s. Other arrangements for spilling (4-5 mm gauge sheet gabions, sheet piling), might also be promising.

c) *Crues de projet de plus de 1 000 m³/s*

Ils représentent environ 20 % du nombre de ces ouvrages de moins de 30 mètres de hauteur et la plus grande partie de leur coût total. C'est généralement le déversoir qui représente la part la plus importante du coût, les problèmes d'exécution des travaux en rivière étant également un élément essentiel.

Dans 80 % des cas ces barrages sont vannés, et le coût de l'évacuateur comprenant génie civil, vannes et incidence des travaux en rivière dépasse souvent 5 000 US\$/m³/s.

Il s'agit parfois de grands ouvrages situés sur des fleuves importants et l'optimisation globale doit tenir compte des méthodes et du programme d'exécution en rivière. Le lit de la rivière est généralement en grande partie sec pendant environ 6 mois par an et une solution très attractive peut consister à ne réaliser avec des vannes classiques qu'une partie du déversoir (environ 30 %) permettant le passage des crues pendant les travaux, l'écoulement du débit solide et l'essentiel du passage des crues modérées. Le reste de l'ouvrage pourrait être constitué de sections en remblai dur (types A ou B), réalisées en saison d'étiage et rehaussées par des « flashboards », ou des vannes gonflables, ou des hausses fusibles ; l'intérêt de cette solution, qui paraît considérable, est justifié en Annexe.

Cette solution semble particulièrement attractive, même pour des débits supérieurs à 10 000 m³/s, pour les fleuves à caractère saisonnier très marqué, les délais d'exécution pouvant alors être considérablement réduits par la construction en étiage des structures non vannées relativement simples.

d) *En résumé*

Plus encore que pour les très grands barrages, des économies très considérables sont envisageables sur la plupart des ouvrages de moins de 30 mètres de hauteur (y compris ceux inférieurs à 15 mètres).

Le choix des solutions dépend beaucoup du débit à évacuer et du programme de construction. Les solutions proposées peuvent permettre de s'affranchir de l'aléa hydrologique très important pour beaucoup de ces ouvrages.

5.1.4. Observations pour l'ensemble des ouvrages

Les comparaisons faites ci-dessus pour les différentes hauteurs de barrages sont résumées dans le Tableau 6 ci-après.

L'économie moyenne potentielle peut souvent être de l'ordre de 25 % ; il ne s'agit que d'ordre de grandeur, l'économie réelle due à ces solutions pouvant être suivant les cas beaucoup plus importante ou beaucoup plus faible, mais les possibilités globales d'économies sont probablement supérieures, en effet :

— Certaines économies indirectes n'ont pas été prises en compte : gain de délai, implantation plus facile d'ouvrages déversants que d'ouvrages en remblais classiques, utilisation de deux solutions pour un même ouvrage,...

— *Il existe certainement d'autres solutions économiques que celles décrites ci-dessus. On s'est en effet limité à des solutions utilisant des matériaux connus, disposés de façon non classique. D'autres dispositions ou l'emploi, par exemple pour le*

c) *Design flood greater than 1 000 m³/s*

This class represents about 20 per cent of dams less than 30 m high and a much larger part of their overall cost. The spillway is usually the most expensive item, although the construction work in the river channel is also an important factor.

80 per cent of these dams are gated and the cost of the spillway including civil works, gates and impact of work in the river channel often exceeds \$US 5 000 per m³/s.

The dam is frequently a large structure on a major river and overall optimisation must take proper account of the method and programme of works when building the part in the river channel. A large part of the river is generally dry during about six months per year. A very attractive solution might be to build only part of the spillway (say about 30 per cent) with conventional gates to pass river floods during construction, the solid load and most of the moderate permanent floods. The remainder could be hardfill (alternatives A or B) built in the low water season, topped by flashboards, inflatable gates or fusegates.

It seems very promising even for discharges of more than 10 000 m³/s where the flow pattern has a very seasonal character, since construction time can be very considerably shortened by building the very simple ungated sections in the low water season.

d) *Summary*

More so than with very large dams, very considerable savings are conceivable on most dams up to 30 m high (including those of less than 15 m).

The choice of alternative is closely dependent on the size of floods to be discharged and on the construction programme. The new arrangements suggested may overcome the very large hydrological contingency factor existing with many of these dams.

5.1.4. Remarks

The above comparisons within each height range are summarised in the Table 6 hereafter.

The mean potential saving can often be in the range of 25 %, although it is only an order of magnitude estimate, the actual saving from the suggested alternatives being much more or less in individual cases, but *the total potential is probably greater*, since:

— Certain indirect savings have not been included: shorter construction time, more convenient siting of overspill dams as compared with conventional embankment dams, combination of two alternative types in one dam, etc.

— *There are certainly other economical alternatives in addition to those discussed*, since this report is confined to those using familiar materials which are innovative only because of the way they are arranged in the dam. Other arrangements,

corps du barrage, de terre armée, parois moulées, écrans en béton bitumineux, géotextiles, etc. peuvent apporter bien d'autres économies.

— Indépendamment des solutions ci-dessus, de nombreuses économies sont possibles dans le traitement des fondations ou le contrôle des crues pendant les travaux et n'ont pas été prises en compte dans les évaluations.

— L'optimisation des vannes et des seuils libres sur les plans de l'économie et de la sécurité peut encore faire de grands progrès.

— Enfin, il n'y a aucune raison que les progrès en matière de matériaux, matériels, études, procédés, etc. se ralentissent.

5.2. COMPARAISON POUR LES PAYS A FAIBLE COÛT DE MAIN-D'ŒUVRE

Dans beaucoup de pays, le coût moyen de la main-d'œuvre, qualifiée ou non, est inférieur à 1 US\$/heure, et certains de ces pays réalisent par des moyens manuels beaucoup d'ouvrages de hauteur modérée. Par ailleurs, *la construction de barrages dans ces pays représente souvent une part très importante des investissements globaux et économiser sur le coût des barrages est donc encore plus nécessaire qu'ailleurs.*

5.2.1. Ouvrages de plus de 100 mètres de hauteur

Ils ne représentent en nombre que deux pour mille des barrages de ces pays, et en valeur de l'ordre de 10 %. Vu la dimension de ces ouvrages, l'incidence du coût de main-d'œuvre ne modifie guère les besoins de mécanisation, et les coûts de matériels et matériaux (ciment, acier, etc.) sont du même ordre de grandeur que pour les autres pays. Les solutions économiques et les pourcentages d'économie envisageables sont donc analogues.

5.2.2. Ouvrages de 30 à 100 mètres de hauteur

Ils représentent en valeur près de la moitié des investissements réalisés. Leur réalisation peut être faite, suivant les cas, avec des moyens mécaniques ou essentiellement avec des moyens manuels. La plupart des solutions envisagées ci-dessus peuvent s'appliquer aux pays à faible coût de main-d'œuvre, mais les solutions les plus économiques dans chaque cas peuvent être différentes ainsi que les dispositions optimales.

Les économies obtenues peuvent être encore plus importantes que dans les pays à coût de main-d'œuvre élevé ; en effet :

— dans le cas de chantiers mécanisés, les solutions non classiques envisagées conduisent proportionnellement à une plus forte réduction des dépenses de matériels que de main-d'œuvre et à des spécifications moins contraignantes sur les matériaux utilisés,

— dans le cas de chantiers utilisant essentiellement des moyens manuels, les solutions envisagées conduisent souvent à une très forte réduction des tonnages à déplacer et permettent facilement l'emploi de remblais provenant d'emprunts proches ou des fouilles d'ouvrages,

— pour certaines solutions, on peut envisager la maçonnerie au lieu du béton compacté ou de « remblai dur »,

or use for example of reinforced earth, diaphragm walls, bituminous concrete barriers, geotextiles, etc. might offer further savings.

— Apart from the alternatives suggested, much more might be saved in the manner of treating foundations and controlling floods during the construction period, these have not been considered in the estimates.

— Cost and safety optimisation of gates and overspill sills is amenable still to much progress.

— Lastly, there is no reason why progress should not continue in materials, plant and equipment, design methods, techniques, etc.

5.2. COMPARISONS FOR COUNTRIES WITH LOW LABOUR COSTS

In many countries, the average cost of skilled and unskilled labour is less than \$US 1 per hour and some build many dams of moderate height by manual labour. *Dam construction in these countries frequently forms a major part of total capital investment and savings are even more important here than elsewhere.*

5.2.1. Dams over 100 m

This category only accounts for two per thousand of all dams in these countries in number, and around 10 per cent in value. In view of the size of such structures, labour costs have little bearing on the need for mechanization and the cost of plant and materials (cement, steel, etc.) is much the same as in other countries. Economical alternatives and percentage savings are therefore similar.

5.2.2. Dams 30-100 m high

In value, these represent nearly half of all capital investment. They may be built with mechanized means or mostly by manual labour. Most of the alternatives discussed earlier apply too to countries with a cheap workforce, but the most economical design in any particular case may be different, as may be the optimum arrangements.

Potential savings are probably even greater than in high-labour-cost countries because:

— On mechanized jobsites, the suggested innovative alternatives tend to have a proportionately greater impact on plant costs rather than labour costs and lead to less stringent material specifications.

— Where construction work is mainly manual, the alternatives often lead to greatly reduced tonnages to be moved and favour the use of fill material available near the site or from the foundation excavations.

— In some cases, masonry might be substituted for roller compacted concrete or hardfill with possibly reduced quantities allowed by hand construction.

— enfin, des études économiques particulières peuvent conduire à d'autres solutions mieux adaptées aux conditions de chaque pays.

5.2.3. Ouvrages de moins de 30 mètres de hauteur

Ils représentent, notamment en Chine et en Inde, 80 % du nombre et la moitié en valeur des ouvrages construits.

Les solutions envisagées dans le cas de fortes crues, pour les pays à coût de main-d'œuvre élevé, s'appliquent également. Pour les crues faibles ou modérées, de nombreuses solutions peuvent être intéressantes, par exemple :

- les ouvrages massifs en maçonnerie de type A, B1 ou B2,
- dans le cas de fondation rocheuse, l'utilisation de la solution B2 : noyau en maçonnerie lesté par des remblais, ou la solution C qui nécessite de faibles quantités de béton armé ou de maçonnerie et réduit de manière très considérable le coût des remblais.

L'intérêt de ces solutions peut, dans certains cas de bon rocher, s'étendre à des ouvrages d'une hauteur supérieure à 30 mètres.

5.2.4. Observations pour l'ensemble des ouvrages

Pour la plupart des ouvrages, les économies envisageables sont donc très importantes, mais les différences de conditions économiques et de traditions ne permettent pas d'estimer quelles sont les solutions les mieux adaptées à chaque pays.

5.3. OBSERVATIONS GÉNÉRALES

L'optimisation économique des projets de barrages pourrait donc conduire dans les prochaines années, dans la plupart des pays, à des réductions de coût très importantes, analogues aux gains obtenus ces dernières décennies dans de nombreux domaines. Cette recherche d'économies doit naturellement tenir le plus grand compte de la sécurité des ouvrages. Certaines solutions envisagées ci-dessus permettent *une amélioration de la sécurité réelle*, en évitant ou en réduisant les risques dus aux déversements non prévus, à l'érosion interne et aux conséquences de défauts mal connus dans les sols de fondations.

Par ailleurs, les solutions non classiques envisagées :

- réduisent généralement le volume des matériaux, c'est-à-dire celui des emprunts et des carrières,
- utilisent souvent des remblais intervenant essentiellement par leur poids, pouvant provenir des fouilles ou des zones noyées par la retenue,
- permettent souvent le déversement sur le corps du barrage.

Ces trois dispositions réduisent fortement les atteintes à l'environnement et peuvent permettre une meilleure acceptation des futurs barrages.

— Lastly, specific cost studies might well produce designs more closely tailored to conditions prevailing within any given country.

5.2.3. Dams less than 30 m high

This category represents 80 per cent in number and half the value of all dams in China and India especially.

The alternatives for large floods in countries with high labour costs apply here also. For moderate to low floods, many other types may be attractive, for instance:

- massive masonry structures like alternatives A, B1 or B2,
- with rock foundations, alternative B2 with masonry core surrounded by weighting fill or alternative C using small quantities of reinforced concrete and masonry, greatly reducing the cost of the fill.

If the rock is good, these alternatives might also be attractive for heights above 30 m.

5.2.4. Remarks

For most dams, possible savings are very large, but differences in economic conditions and traditions make it impossible to guess which specific alternatives are best for any given country.

5.3. GENERAL REMARKS

It has been shown that cost optimisation in dam design is likely to lead in the coming years to major savings in most countries, similar to those attained over previous decades in other areas of engineering. The trend towards savings must of course give full weight to safety. Some alternatives suggested in this report *could frequently improve real safety* by avoiding or reducing risks from accidental overtopping, internal erosion and the consequences of unexpected defects in the foundation.

In addition, these alternatives:

- usually reduce the materials volume required, i.e. the materials that have to be found in borrow areas and quarries,
- often make use of fill chiefly for its weight, so that it can be taken from the foundation excavations or from the reservoir area,
- frequently enable floods to be discharged over the dam itself.

These three features greatly attenuate the impact on the environment and may help to make dams more acceptable to the public in the future.

Tableau 6
CONDITIONS D'EMPLOI DE SOLUTIONS NON CLASSIQUES
 (décrites en Annexe)

Les choix devront être basés sur des études soignées réalisées par des ingénieurs expérimentés et faire très attention à la qualité de la fondation

Solutions classiques les plus utilisées actuellement	Solutions non classiques envisageables dans les différents cas												
	A	B1	B2	C	D1	D2	D3	E1	E2	F1	F2	G	
<i>Hauteur > 100 m</i> Barrages en enrochement Barrages-poids	X				X			X X	X				
<i>Hauteur entre 30 et 100 m</i> Barrages en terre non fondés au rocher Barrages en terre fondés au rocher Barrages en enrochement fondés au rocher Barrages-poids en béton Barrages écrêteurs de crues	X X X				X X X		X X X	X X X	X X X	X X X	X X X	X	
<i>Hauteur < 30 m</i> Barrages à débit de crues moins de 100 m ³ /s Entre 100 et 1 000 m ³ /s Plus de 1 000 m ³ /s	X X X										X		

La solution C paraît intéressante dans les pays à faible coût de main-d'œuvre : dans ces pays, la maçonnerie pourrait être utilisée au lieu du béton ou remblai dur dans beaucoup de solutions.

Table 6
OPPORTUNITIES FOR USE OF SOME INNOVATIVE DESIGNS (described in Appendix)

Choices are subject to careful study be experienced engineers and should take great care of quality of foundation

	Innovative designs which could be studied for different cases											
	A	B1	B2	C	D1	D2	D3	E1	E2	F1	F2	G
Most common conventional designs today												
<i>Height > 100 m</i> Rockfill dams Gravity dams	X				X			X	X			
<i>Height between 30 and 100 m</i> Earthfill dams on soil Earthfill dams on rock Rockfill dams on rock Concrete gravity dams Flood control dams	X X X				X X X		X X X	X X X	X X X	X X X	X X X	
<i>Height < 30 m</i> Dams with design flood Less than 100 m ³ /s Between 100 and 1 000 m ³ /s More than 1 000 m ³ /s	X X X	X X X	X X	X X		X						X X

Alternative C appears attractive for countries with low labour costs: in these countries, masonry could be often used instead of RCC or hardfill in many alternatives.

6. DISPOSITIONS FACILITANT LES ÉCONOMIES

6.1. CONDITIONS ACTUELLES

La grande majorité des ouvrages d'art modernes : ponts, tunnels, ouvrages maritimes, grands immeubles, ouvrages autoroutiers, diffèrent très largement par leurs formes, leurs matériaux, leurs méthodes d'exécution des ouvrages construits il y a une quarantaine d'années.

La plupart des barrages actuels utilisent les mêmes formes et les mêmes matériaux que les ouvrages construits il y a 40 ans ; et l'on cherche plus, par exemple, à adapter le béton compacté aux formes et spécifications traditionnelles qu'à adapter les projets aux qualités de ce matériau.

On invoque parfois la sécurité pour expliquer l'absence d'innovation, mais dans les autres techniques l'innovation a amélioré la sécurité en même temps que l'économie. La lente évolution des barrages est probablement due, en fait, à l'absence des trois conditions qui permettent ou stimulent l'évolution ou l'innovation dans la plupart des autres techniques :

- connaissance précise des coûts,
- compétition pour le choix des solutions,
- prise en compte du point de vue des constructeurs.

a) *Connaissance précise des coûts unitaires*

La connaissance précise des coûts unitaires d'un barrage est, en fait, impossible sans une étude analogue à celle des Entrepreneurs lors des soumissions ; en effet, le faible nombre de barrages construits par an dans la plupart des pays, ainsi que leurs caractéristiques très différentes, donnent généralement peu de références précises. Par ailleurs, l'essentiel des coûts unitaires varie beaucoup, non seulement suivant le site, mais également suivant le type d'ouvrage, le programme, les spécifications. Enfin, les coûts relatifs peuvent évoluer en quelques années.

L'incertitude qui existe sur les coûts unitaires réels est donc souvent beaucoup plus importante qu'on ne le croit, ce qui explique que deux bureaux d'études étudiant un même barrage peuvent préconiser deux solutions différentes. Des Entrepreneurs soumissionnant pour un barrage ne peuvent estimer avec exactitude leurs coûts et comparer des solutions avec précision qu'après une étude détaillée. L'évaluation relative des coûts unitaires et même du coût global de deux solutions peut d'ailleurs varier beaucoup suivant les Entrepreneurs.

b) *Compétition*

S'il existe une compétition forte et parfois trop forte pour attribuer les études ou les travaux d'un barrage, il n'existe généralement pas de compétition au moment

6. NEW PROCEDURES FOR PROMOTING SAVINGS

6.1. PRESENT CONDITIONS

Most modern civil engineering structures like bridges, tunnels, coastal works, large buildings and motorway structures are very different from what was being built forty years ago in their shapes, materials, and construction methods.

Most modern dams on the other hand are the same shape and use the same materials as those built in the last forty years and we are more concerned for example in forcing roller compacted concrete to fit traditional shapes and specifications than in altering our designs to suit the particular advantages of this new material.

Concern for safety may be invoked to explain the absence of innovation, but in other areas innovation has improved safety while bringing down costs. The slow pace of change in dam engineering is in fact probably due to the absence of three conditions that permit or stimulate new solutions in most other areas:

- accurate cost data,
- competition in choice of final design,
- consideration of the builder's (i.e. contractor's) viewpoint.

a) *Accurate unit cost data*

It is impossible to have any accurate knowledge of the unit costs of a dam without undertaking the kind of study made by a contractor in preparing his tender. The fact that few dams are built yearly in most countries and their widely differing features means that there is no precise reference available. Furthermore, unit costs vary widely with conditions at site but also with dam type, works programme and specifications. Lastly, relative costs may change rapidly over the space of a few years.

The uncertainty on real unit costs is therefore often much greater than believed, which explains how two designers can recommend different designs for the same project. Contractors tendering for a dam cannot estimate their costs with accuracy and compare alternatives until they have made a detailed study. The relative estimates of unit costs and even the total cost of two alternatives may in fact vary considerably from one contractor to another.

b) *Competition*

While there is (sometimes excessive) competition in awarding dam design and construction contracts, there is generally little competition in selecting one design

de choisir un projet parmi d'autres, et les Maîtres d'Ouvrage sont souvent réticents à payer les coûts d'études nécessaires pour explorer suffisamment plusieurs solutions, notamment des solutions non classiques. Celles-ci ne sont guère proposées qu'en cas d'impossibilité d'employer des solutions classiques.

Le projeteur, souvent très limité financièrement dans ses moyens d'investigation et d'études, parfois coincé dans des délais trop courts, est tenté d'adopter d'emblée des solutions connues que personne ne pourra lui reprocher. Il évite souvent toute innovation, source de questions et de justifications laborieuses. Le mode de sélection des bureaux d'études par concurrence sauvage sur les niveaux de prix et la limitation financière qui en résulte est l'un des principaux freins à l'innovation. Elle est peu justifiée pour les très grands ouvrages.

c) Prise en compte du point de vue des constructeurs

Le domaine des barrages est un des rares domaines où l'expérience des constructeurs (Entrepreneurs) n'est pas utilisée pour l'orientation des projets futurs. Par ailleurs, les variantes proposées sont rarement admises, sauf en cas de difficultés en cours d'exécution.

6.2. DISPOSITIONS SUGGÉRÉES

Une partie des difficultés ci-dessus découle directement de la spécificité des barrages, mais il est possible d'envisager des dispositions permettant d'en réduire les conséquences. Ces dispositions, dont certaines sont déjà utilisées par quelques Maîtres d'Ouvrage, peuvent être très différentes suivant les caractéristiques des ouvrages et surtout suivant leur taille.

6.2.1. Barrages supérieurs à 100 mètres de hauteur

Dans le monde, il ne s'en construit qu'une dizaine par an. Le coût unitaire en est élevé ce qui permet des études poussées, alors que le nombre de solutions envisageables est souvent restreint. Il est probablement possible d'améliorer l'économie de ces ouvrages :

- en faisant étudier de manière suffisamment détaillée plusieurs projets par un seul ou plusieurs bureaux d'études, sans exclure les solutions innovantes,
- en créant très tôt un « panel » d'experts pour proposer ou encourager des solutions plus économiques,
- en faisant réaliser par un Entrepreneur (et en payant) une analyse des coûts comparés de deux ou trois solutions,
- en mettant en appel d'offres deux solutions.

Le surcoût de ces procédures est négligeable en regard des économies potentielles sur l'investissement total.

6.2.2. Barrages de moins de 30 mètres de hauteur

Il s'agit souvent d'ouvrages relativement peu coûteux pour les Maîtres d'Ouvrage qui ne peuvent guère dépenser beaucoup en études préalables.

in preference to another and owners are often hesitant at paying for the cost of the studies needed to explore several alternatives to a sufficient degree of detail, especially when unconventional designs are concerned. New designs are almost never suggested except where conventional types are unfeasible.

The designer, often underpaid for the importance of studies to be made, within even too short time, is often choosing from the beginning a well-known solution which will not be criticized; he will generally avoid any innovation requesting more studies, more time, more explanations. This choice of designer by excessive competition and the lack of financial resources for the design is actually one main obstacle to innovation. This is not justified for very large dams.

c) Reference to Contractors' viewpoints

Dams represent one of the few areas in which the builder's, i.e. the contractor's viewpoint is ignored in guiding change. Alternatives proposed by the contractor are in fact almost never accepted except for unforeseen difficulties arising in the course of the works.

6.2. SUGGESTED PROCEDURES

Some of the difficulties mentioned arise out of the "one-off" nature of dams but one can imagine arrangements which would attenuate the problem. Some are already operated by certain owners, but they might be very different according to dam height and other features.

6.2.1. Dams over 100 m

Only about a dozen dams more than 100 m high are built each year in the world. They are expensive, justifying a considerable design effort, but there is not usually much real choice of alternatives. It would probably be possible to reduce the cost of this category by:

- Devoting enough time and money to several designs (possibly including innovative ones), through one or several designers,
- Bringing in a panel of few experts at a very early stage to suggest or encourage more economical designs,
- Having a contractor make a comparative cost analysis of two or three alternatives (and paying him for it),
- Inviting tenders for two alternative designs.

The extra cost of these procedures is negligible beside the potential saving on total capital cost.

6.2.2. Dams less than 30 m high

Dam less than 30 m high are usually low-cost projects and the owner has little to spend on preliminary engineering.

Dans de nombreux cas, une solution clés en main (turnkey) attribuée après un concours entre Entrepreneurs associés à un Bureau d'études pourrait permettre des solutions économiques. Les études minimales avant cet appel d'offres devraient cependant inclure des études générales et des reconnaissances géologiques. Les entreprises pourraient, soit proposer une solution de leur choix, soit éventuellement chiffrer une solution de base définie dans l'appel d'offres. Mais il est souhaitable que les propositions incluent de manière forfaitaire ou quasi forfaitaire les études, la construction et la garantie, par exemple pendant dix ou vingt ans (des ajustements éventuels du forfait ne s'appliquant qu'au traitement ou à l'approfondissement des fondations, et dans des conditions précisées au départ).

6.2.3. Barrages compris entre 30 et 100 mètres de hauteur

Pour ces hauteurs intermédiaires, il est probablement réaliste et souvent intéressant d'étendre la solution ci-dessus du concours clés en main aux ouvrages fondés au rocher et soumis à des crues importantes, parce que ce sont pour ces ouvrages que les possibilités d'économies paraissent les plus élevées.

A défaut de concours clés en main, certaines variantes des Entrepreneurs devraient être acceptables, notamment pour la maîtrise des crues pendant les travaux.

Pour les ouvrages voisins de 100 mètres, les procédures envisagées pour les très grands ouvrages pourraient s'appliquer.

6.2.4. Observations communes à tous les ouvrages

Les procédures préconisées représentent pour les Maîtres d'Ouvrage un faible surcoût à l'origine et seulement pour les très grands ouvrages, mais leur intérêt à long et moyen termes peut être considérable pour tous les types d'ouvrages.

Une réduction des coûts de construction entraînerait par ailleurs une augmentation du nombre des barrages économiquement justifiés.

Il n'apparaît pas du tout nécessaire, pour une évolution rapide des barrages, que les procédures ci-dessus s'appliquent dans la plupart des cas. Mais il suffirait probablement d'appliquer ces méthodes à 25 % des barrages (soit 50 par an) pour faire apparaître rapidement l'intérêt de nouvelles solutions qui pourraient alors s'appliquer à la majorité des ouvrages.

Par ailleurs, il pourrait être très utile, comme c'est le cas dans quelques pays, d'inclure dans la plupart des contrats de construction des « Value Engineering clauses » suivant lesquelles un Entrepreneur peut proposer des variantes de méthodes, de programmes, de matériaux ou de projets et recevoir une part des économies résultant des variantes acceptées.

In many cases, a turnkey contract awarded on the basis of a competition between contractor/consulting engineer groups would be productive of economical projects. The minimum preliminary studies and geological investigations would have to be done before inviting tenders. Contractors might be asked to submit their own designs or to cost a basic design specified in the tender invitation. But it is desirable that tenders should be made on the basis of an all-inclusive stipulated sum covering all design, construction and guarantee, say for ten or twenty years (any payments over and above the tender sum only being due for deeper foundation excavations or treatment under carefully specified conditions).

6.2.3. Dams 30-100 m high

For these intermediate heights, it would probably be realistic and often attractive to extend this turnkey procedure at sites with a rock foundation and large floods because this is where there are the best opportunities for reducing costs.

If the turnkey procedure is not used, certain contractor's alternatives should be considered, especially for river control during construction.

For heights approaching 100 m, the procedures suggested for the > 100 m category might be applicable.

6.2.4. General remarks

The recommended procedures would involve some extra design cost to owners at the outset, but only for very large dams, and their benefits in the middle and long term could be considerable for all types of dam.

A reduction in costs would increase the number of economically feasible dams.

It would not be necessary for the suggested procedures to be applied to all projects but only to about 25 per cent (i.e. 50 dams per year) to demonstrate the benefits of innovative alternatives, which would then start to be applied to most dams.

But in most cases, it might be very useful, as is done in some countries, to include in most construction contracts "Value Engineering clauses" by which a contractor can propose alternative methods, schedules, materials, design, and receive a share of savings arising from accepted alternatives.

7. CONCLUSION

La technologie des barrages a évolué plus lentement pendant ces dernières décennies que celle des autres domaines du génie civil, tels que ponts, tunnels, grands immeubles, routes, etc.

La lenteur de l'évolution dans le domaine des barrages est principalement due à la difficulté d'estimation correcte du coût des ouvrages ; cette difficulté résulte certainement de la spécificité des barrages, mais aussi, dans une certaine mesure, de la séparation traditionnelle entre projeteur et entrepreneur. La recherche d'économie basée sur la meilleure utilisation de matériaux conventionnels ou nouveaux et sur la bonne estimation des coûts de construction conduit à de nouvelles formes de barrages. Un certain nombre de solutions pour les barrages et leur déversoir ont été proposées pour illustrer ce qui serait possible, mais n'a pas encore été fait. Ces propositions donnent une bonne idée des améliorations envisageables à court terme.

La mise en œuvre de nouvelles formes exige de la part des ingénieurs la recherche de meilleurs moyens d'évaluation des besoins réels en matière d'exploitation sûre de chaque barrage et du coût minimal correspondant. Dans ce but, une plus grande coopération entre projeteurs et entrepreneurs est souhaitable : c'est la démarche suivie dans les autres domaines du génie civil, et pour les barrages comme dans ces autres domaines il en résultera des ouvrages non seulement plus économiques mais aussi plus sûrs.

* *
*

Mais il faut être conscient que des économies globales importantes peuvent nécessiter un surcoût des études initiales et une adaptation des procédures pour permettre une bonne comparaison des solutions classiques et innovantes.

7. CONCLUSION

The technology of dam design and construction has evolved more slowly, during recent decades, than in most of the other fields of civil engineering, such as bridges, tunnels, highrise buildings, roads, etc.

The slow pace in innovative developments is mainly due to a lack of correct appraisal of the cost of dams, resulting indeed from the specificity of dams and to some extent from the historical separation between designers and contractors. The search for savings, based on sound use of conventional and new materials together with a proper evaluation of construction costs, leads to new dam shapes. A number of solutions for the dams and their spillways have been suggested, to exemplify what could be done, but has not been done thus far. They give an idea of possible improvements in the near future.

The successful implementation of new shapes requires that the profession gains better means for assessing what the real needs are for safe operation of each particular dam and what corresponding minimum cost is to be paid. To this end, closer cooperation between designers and contractors is necessary. This is the process which has been followed in the other fields of civil engineering, and for dams as for these other fields, it will result in not only cheaper but also safer structures.

* *
*

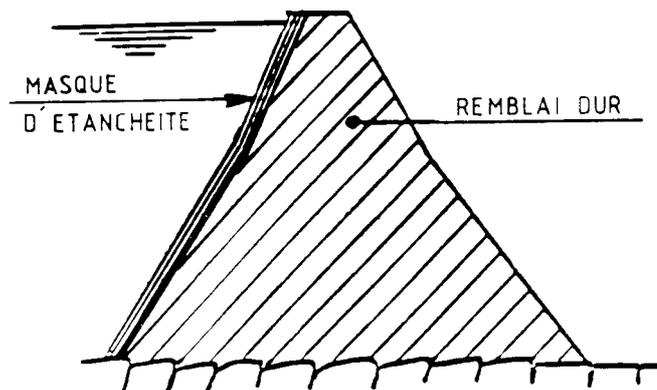
Possibility of important global savings justifies extra cost of initial studies and change of procedures to allow valid comparisons between classical and innovative alternatives.

ANNEXE I

Les solutions inhabituelles présentées ci-après doivent être considérées comme des bases possibles pour les études de futurs projets et non comme des solutions ayant fait leurs preuves : de tels choix devront être basés sur des études soignées réalisées par des ingénieurs expérimentés.

A) BARRAGES EN REMBLAI DUR

Cette solution utilise un matériau du type BCR ou remblai dur, dont les propriétés peuvent varier largement, mais dans lequel un certain niveau de perméabilité est toléré pour garder un niveau de prix unitaire bas, l'étanchéité étant assurée par un masque d'étanchéité (béton armé ou acier).



Solution A

Une grande variété de formes peut être envisagée pour ce type de solution. Les pentes peuvent être différentes pour le parement amont et pour le parement aval, et plus raides en partie haute.

Le barrage peut être conçu pour des déversements occasionnels ou systématiques, si le profil est adapté en conséquence avec un parement aval en marches d'escalier et/ou une cuillère aval.

Grâce au masque amont, le critère de perméabilité globale pour le remblai dur pourrait être de 10^{-5} ou plus, au lieu de 10^{-8} à 10^{-10} m/s pour le béton conventionnel.

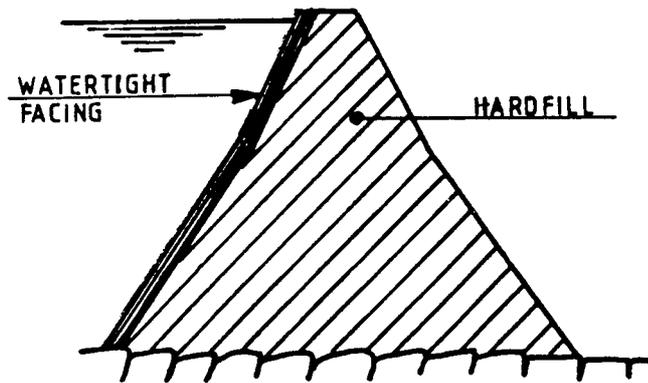
Le talus naturel de ce matériau pendant sa mise en place est environ 0,7/1, mais il peut être raidi moyennant un faible surcoût. Les pentes des talus peuvent donc être optimisées, en fonction du matériau et des contraintes acceptables pour le projet au niveau de la fondation. Les contraintes dans le remblai dur sont faibles, acceptables pour un matériau économique à faible teneur en ciment : un peu de ségrégation pendant la mise en œuvre peut être acceptée.

APPENDIX I

The unusual alternatives presented hereunder should be considered as a possible basis for future design studies and not as fully proven solution: such choices should be based upon careful study by experienced engineers.

A) *HARDFILL DAMS*

These alternatives use an RCC-type or hardfill type material whose properties may vary widely but in which some degree of permeability is tolerated to keep down unit costs, watertightness being provided preferably by an impervious facing in RC or steel.



Alternative A

A variety of shapes can be considered for this type with different angles of batter for the upstream and downstream faces, possibly steeper in the upper part.

The dam can be designed for overtopping occasionally or systematically, if the profile is suitably designed, with stepped downstream face and/or flip bucket.

Imperviousness resulting from upstream facing, global permeability of the hardfill could be 10^{-5} or more, instead of 10^{-8} to 10^{-10} m/s in conventional concrete.

The natural angle of this material during placement is around 0.7/1, but it can be steepened at a slight extra cost. The face slopes could then be optimised, depending on the design stress at the foundation level and quality of hardfill. Stresses in the hardfill are low, allowing the use of an economic low cement content and making some placement segregation not detrimental.

La largeur à la base du profil étant de 1 à 1,5 fois sa hauteur h , le volume de matériau nécessaire représente 0,5 à 0,75 h^2 , mais ce type de barrage peut être construit sur de nombreux sites car :

- les contraintes au niveau de la fondation sont faibles et sensiblement constantes, que le réservoir soit plein ou vide (environ la moitié du niveau de contrainte sous un barrage classique à profil poids). Aucune contrainte de traction n'apparaît même en cas de séisme ;
- le profil est stable même avec un niveau élevé de sous-pressions (ce qui permet de réduire le traitement de la fondation) ;
- le tracé en plan du barrage peut être arqué, le volume de matériau étant diminué et/ou la sécurité augmentée ;
- compte tenu de la répartition des contraintes au niveau de la fondation, le profil est beaucoup plus stable qu'un profil poids classique en cas d'érosion au pied aval.

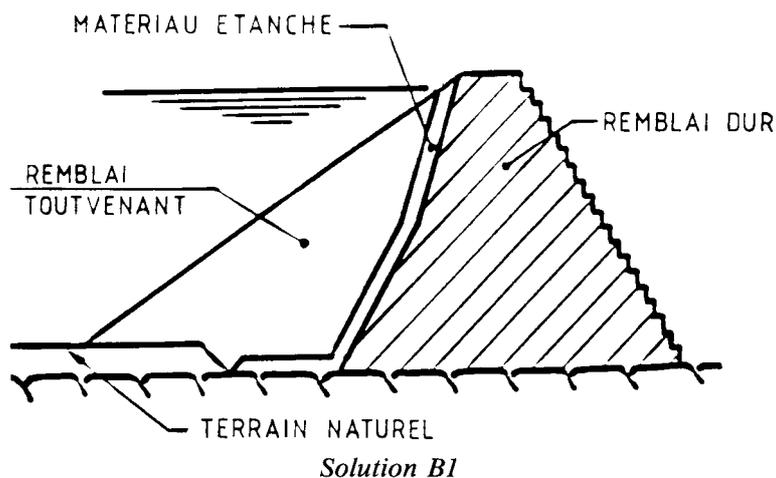
Au vu de ces considérations, on peut envisager dans beaucoup de cas de réduire la profondeur des excavations par rapport à un profil poids classique, et dans certains cas d'appliquer cette solution alors que les conditions de fondation ne permettraient pas d'envisager un barrage-poids classique.

Par rapport à de nombreux projets classiques, la solution A offre une sécurité supplémentaire en cas de crue de projet sous-estimée ou de séisme. Le béton compacté ou remblai dur peut être différent pour chaque barrage, le projet doit être adapté à chaque cas, comme pour les barrages en remblai.

B) BARRAGES EN REMBLAI DUR LESTÉ

Dans ces solutions le remblai dur est associé à un remblai économique en matériaux tout venant, qui est utilisé à la fois comme accès pendant la construction, coffrage et pour son poids ; un matériau sablo-argileux est mis en place à l'amont du remblai dur pour contrôler l'étanchéité.

— Solution B1



The width at the base of the profile would be 1 to 1.5 times the height h . The volume of material required represents 0.5 to 0.75 h^2 but this type of dam could be built at many sites since:

- foundation stresses are low and almost the same with the reservoir full or empty (half the conventional gravity dam stress level), both in shear and compression. No tensile stresses develop even for earthquake loading,
- the profile is stable even with considerable uplift pressures (enabling the foundation treatment to be reduced),
- if the dam were arched in plan view, the volume could be reduced and/or safety increased,
- by reason of the foundation stress distribution, the profile is much more stable than a conventional gravity one if underscoured at the downstream toe.

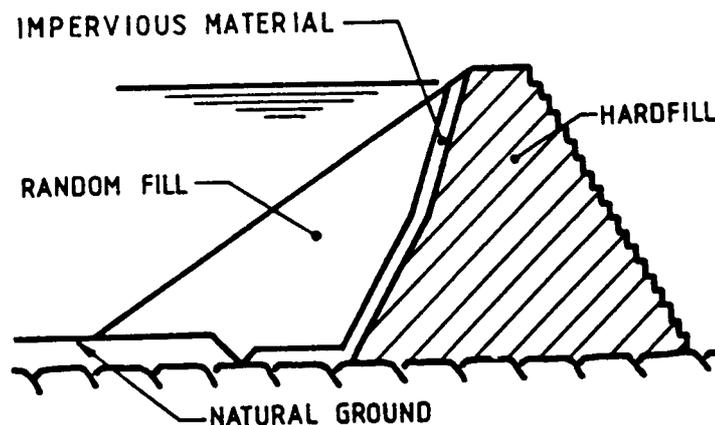
On these considerations, one could envisage in many cases reducing the depth of foundation excavation as compared with the conventional gravity dam alternative and, in some cases, to use this solution where foundation conditions do not allow conventional gravity dam.

Compared with many conventional designs, alternative A offers additional safety in case the design flood is underestimated and in case of earthquake. As RCC or hardfill can be different for each site, design should be adapted accordingly to material properties, as it is the case for fill dams.

B) WEIGHTED HARDFILL DAMS

In these alternatives, the hardfill is combined with cheap random fill which is used as access during construction, shuttering and for its weight; sandy clayey material is placed upstream of the hardfill to control watertightness.

— *Alternative B1*



Alternative B1

La solution B1 est une variante de la solution A avec addition d'un remblai de lest du côté amont.

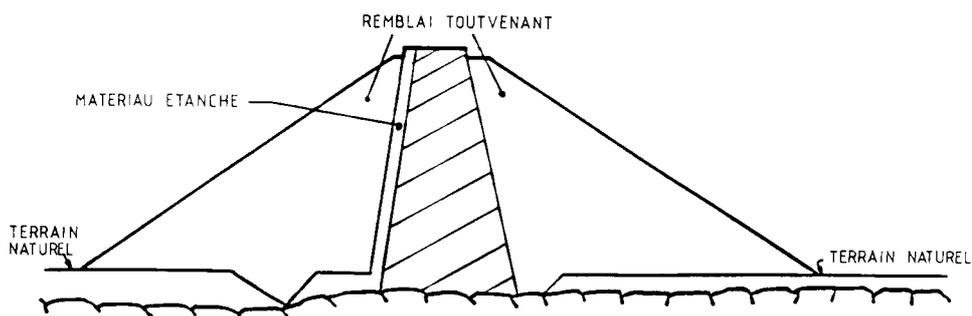
Entre le remblai tout venant et le remblai dur, il y a une couche de matériau étanche, soit naturel, soit constitué par les fines du matériau utilisé pour le remblai dur où le ciment est remplacé par du silt (la granulométrie de ce matériau étanche étant choisie pour permettre de colmater les fissures pouvant apparaître dans le remblai dur). Cette précaution simple est fréquemment utilisée pour les barrages à masque amont également appelés CFRD (cf. Bulletin 70 de la CIGB, Fig. 3, pages 24-25), et est habituelle depuis de nombreuses années pour les ouvrages en palplanches.

Cette solution peut convenir à de nombreux types de fondations, encore plus facilement que la solution A. Le barrage peut être arqué pour réduire le volume de remblai dur.

Cette solution semble très économique pour les barrages de faible hauteur : elle supporte un déversement en crête (la crue de projet n'est pas toujours bien estimée pour ces barrages), résiste à l'érosion interne et les contraintes sur la fondation sont faibles.

L'étude devra tenir compte des caractéristiques des divers matériaux et des mouvements aux limites de zone ainsi que de la plupart des problèmes liés aux barrages en remblai. Des séismes importants peuvent avoir un impact sur le projet.

— Solution B2



Solution B2

La conception de l'étanchéité de cette solution est dérivée du concept de noyau en terre dans un barrage en remblai, mais il est réalisé en remblai dur. Pour sa stabilité, il se comporte comme un remblai dur lesté. L'étanchéité peut être améliorée en utilisant un matériau étanche comme dans la solution B1.

Un drainage doit être prévu à l'aval du noyau si le remblai tout venant de la recharge aval n'est pas assez perméable.

Ce type de barrage a été essayé avec succès pour des batardeaux amont de barrages en construction et pour le barrage d'ITZE en Allemagne. Les dommages en cas de submersion pendant la construction seraient beaucoup plus faibles qu'avec un noyau en terre.

Dans les pays où le coût de la main-d'œuvre est bon marché, le remblai dur peut être remplacé par de la maçonnerie.

Alternative B1 is a variant of A, with the addition of a weighting fill on the upstream side.

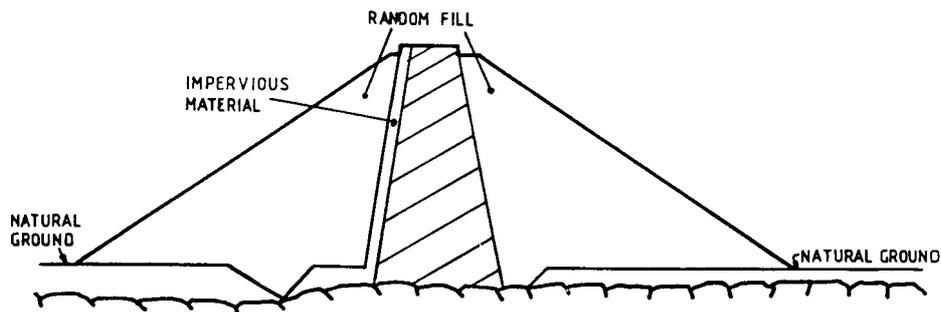
Between the random fill and the hardfill, there is a layer of impervious material, either a naturally-occurring material or the finer portion of the hardfill where the cement is replaced by silt (the grain size of this material must be selected to suit the widths of cracks liable to appear in the hardfill). This simple precaution is frequently employed in dams with an upstream facing also called CFRD (cf. ICOLD Bulletin 70, Fig. 3, pp. 24-25), and has been familiar for many years in sheet-piling work.

This alternative might suit numerous foundations even more easily than A. The dam might be arched, to reduce hardfill volume.

This solution seems attractive for low dams: it is safe against overtopping (design flood is not always well estimated for such low dams), is resisting to internal erosion and stresses on foundation are low.

The study should take great care of properties of all materials and of the boundary problems as well as most of problems associated with fill dams. Hardfill should be designed adequately for earthquakes forces.

— Alternative B2



Alternative B2

The watertightness of this alternative derives from the earth core concept in a conventional embankment dam, except that it is made of hardfill. But its response is like that of a weighted hardfill. Watertightness can be enhanced by using an impervious material, as in alternative B1.

Drainage must be provided on the downstream side of the core if downstream random fill is not pervious enough.

This type has already been successfully tried for upstream cofferdams at dam construction sites and for ITZE dam in Germany. Damages due to possible overtopping during construction are much less than with an earth core.

In countries with cheap labour, masonry could be substituted for the hardfill.

Le volume de remblai dur est plus faible que pour la solution B1, mais les contraintes sur la fondation sous le remblai dur sont plus élevées, ce qui limite l'application de cette solution aux sites rocheux ; mais elle peut mieux s'appliquer, en cas de fondations rocheuses saines mais avec des joints ouverts, qu'une solution à noyau en terre.

Les points à étudier sont pour l'essentiel les mêmes que pour la solution B1.

C) BARRAGES EN BÉTON ARMÉ LESTÉ

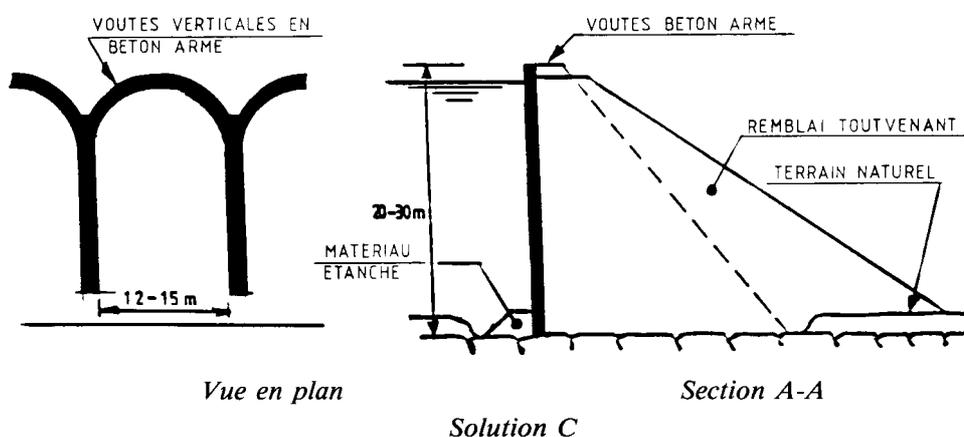
Cette solution est inspirée par les barrages à voûtes multiples.

Elle n'est pas intéressante pour les pays où le coût de la main-d'œuvre est élevé, mais peut être prometteuse ailleurs du fait de la grande réduction du volume de matériaux, telle que des structures de hauteur modérée pourraient être construites avec des moyens surtout manuels.

Les voûtes et leurs contreforts d'appui sont lestés par effet silo, par le remblai interne en matériau tout-venant.

Les voûtes et les contreforts seraient normalement réalisés en béton armé. Mais quand le coût de la main-d'œuvre est bon marché, les contreforts pourraient être en maçonnerie, les voûtes étant ancrées dans des zones en béton armé à l'intérieur de la maçonnerie.

Les problèmes d'interface, de percolation, les risques de fissure dans les voûtes en béton armé doivent être étudiés très soigneusement, ainsi que l'effet des séismes importants.



Le schéma de la solution C ci-dessus correspond à un ouvrage non déversant. Pour permettre un déversement sur la crête, on peut facilement poser une dalle continue en béton armé sur une ou plusieurs cellules entre 2 contreforts. Ces dalles pourraient être coulées sur du remblai, mais finalement seraient portées par les contreforts.

Volume of hardfill is less than for alternative B1, but stresses in foundation under hardfill are higher, which limits its use to rock foundations; but it may apply to open jointed sound rock foundations better than earth core dams.

The study should take great care of properties of all materials and of the boundary problems as well as most of problems associated with fill dams. Hardfill should be designed adequately for earthquakes forces.

C) WEIGHTED REINFORCED CONCRETE DAMS

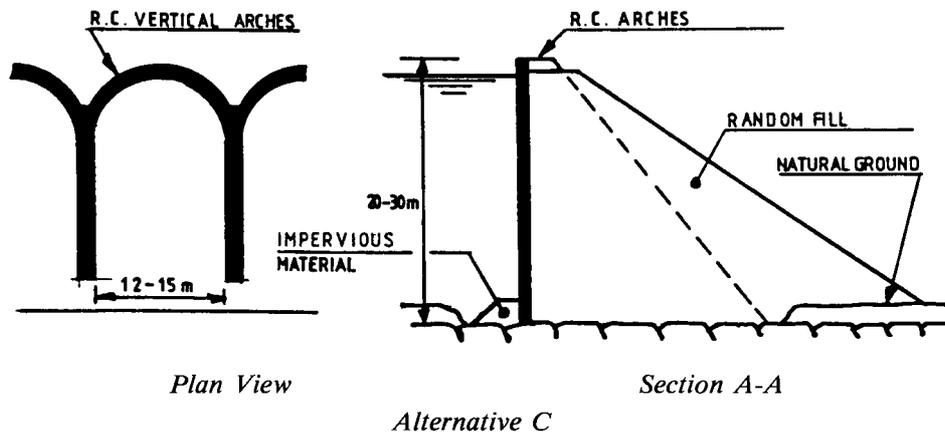
The following proposal derives from the multiple arch dam.

It is not attractive for countries with high labour costs but might be very promising elsewhere by reason of the greatly reduced materials volume, so that moderately high structures can be built mainly by manual labour.

The arches and supporting buttresses are weighted by the silo effect, by the random fill infilling.

The arches and buttresses would normally be reinforced concrete. Where labour is cheap, however, the buttresses might be masonry with the arches anchored on reinforced concrete pads in the masonry.

Problems of boundary, leakage, risks of cracks in RC arches should be studied carefully.



Alternative C in the sketch is a non-overspill design. To permit spilling over the crest it is easy to lay continuous reinforced concrete slabs on pairs of buttress webs. Slabs can be poured on fill but finally they are supported by buttresses.

D) ÉTANCHÉITÉ EN ACIER

Dans le cas des barrages en remblai, les précautions prises pour protéger l'étanchéité contre la fissuration ou le tassement ont souvent une incidence importante sur le coût total.

Pour les barrages-poids classiques, les précautions prises pour éviter la fissuration sont également très coûteuses. Le principe de la solution D est de réduire les coûts en acceptant la possibilité de mouvement ou de fissures du corps du barrage et en concevant l'étanchéité en conséquence.

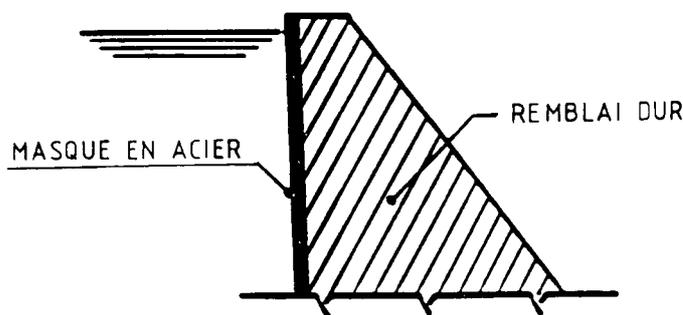
Dans de nombreux cas, un masque en acier avec une provision pour la corrosion peut être une solution attractive qui peut s'appliquer aussi bien à :

- des barrages en remblai dur (D1),
- des barrages en terre (D2),
- des barrages en enrochement (D3).

L'étude devra prendre grand soin de la qualité de l'acier, de sa tenue à long terme et des problèmes d'interface.

D1) Barrages en remblai dur

Cette solution est inspirée des barrages-poids en BCR à masque amont, ou des barrages chinois en maçonnerie avec un masque en béton.



Solution D1

Le prix unitaire du remblai dur peut être maintenu bas en prévoyant une étanchéité séparée sur le parement amont, réalisée par une tôle ou des palplanches, ce qui permet de réduire les spécifications pour le corps du barrage, particulièrement en ce qui concerne l'étanchéité.

Une étanchéité en acier séparée :

- remplacerait également le coffrage du parement vertical, et
- renforcerait la partie haute de l'ouvrage, améliorant la sécurité vis-à-vis du déversement et d'un séisme.

Le volume de remblai dur nécessaire est environ $0,4 h^2$.

D) *STEEL WATERTIGHTNESS*

For embankment dams, the precautions taken to protect the watertight component from cracks or settlement have often an enormous impact on total cost.

In conventional gravity dams, the precautions taken to avoid any cracks are very costly. The principle of alternative D is to save cost by accepting the possibility of movement or cracks on the dam body and designing the watertightness accordingly.

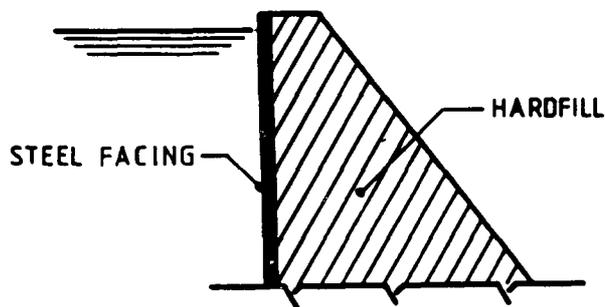
In many cases, using steel lining with provision for corrosion may be an attractive solution and may apply as well to:

- hardfill dams (D1),
- earthfill dams (D2),
- rockfill dams (D3).

However, great care should be taken of quality and protection of steel and of boundary problems.

D1) *Hardfill dams*

This alternative derives from RCC gravity dams with upstream facing or from Chinese masonry dams with concrete facing.



Alternative D1

The unit cost of the hardfill can be kept down by providing a separate watertight component on the upstream face with steel plate or sheet pile which would relax the design criteria for the body of the dam, particularly regarding watertightness.

A separate watertight steel facing would also:

- replace the vertical face shuttering, and
- reinforce the top of the structure, improving safety against overtopping and earthquake.

The volume of material required is about $0.4 h^2$.

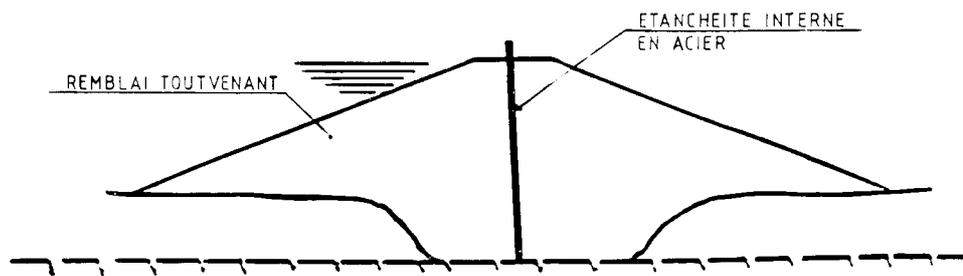
Il pourrait être réduit à 0,3 h² ou moins si le barrage était arqué (un barrage rectiligne, bien que plus facile à implanter et étudier, est probablement le moins favorable).

A cause du coût de l'étanchéité séparée, ce type de barrage est moins intéressant pour les faibles hauteurs.

Cette solution nécessite moins de matériau que la solution A, mais le niveau de contrainte sur la fondation est plus élevé et réparti de manière moins uniforme (les contraintes les plus élevées sont situées en pied amont en fin de construction, et à l'aval quand le réservoir est plein). De ce fait, la solution D1 nécessite une meilleure fondation que la solution A, et est plus vulnérable aux érosions en pied aval du barrage. Il peut être intéressant pour les grands barrages d'adoucir la pente du talus aval en partie basse.

En comparaison avec un barrage-poids classique, cette solution avec son étanchéité amont réduit les conséquences de la fissuration interne et les risques de pression interstitielle.

D2) Barrages en terre



Solution D2

Ce type de projet peut s'appliquer pour des barrages de hauteur modérée, environ 30 m.

L'étanchéité interne peut être réalisée de diverses façons :

- tôle d'acier,
- palplanches mises en place avant remblaiement pour éviter l'ouverture des serrures pendant le battage,
- palfeuilles en acier ou PVC mises en place dans une paroi en bentonite,
- paroi moulée souple.

Tous ces types d'étanchéité interne peuvent être prolongés en fondation. Il peut être utile d'ajouter un matériau fin du côté amont pour colmater des fuites éventuelles.

Il existe donc une large gamme de possibilités, dont le coût peut être très variable. Le prix unitaire de l'étanchéité est généralement de l'ordre de 100 à 200 USD par mètre carré (bien que certaines solutions puissent être moins chères) et est relativement indépendant des conditions du site.

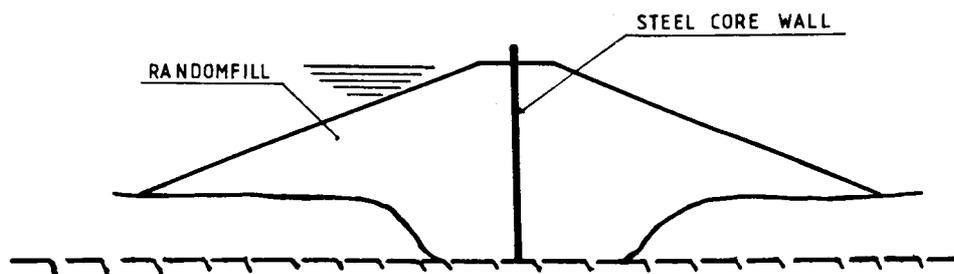
It could be reduced to $0.3 h^2$, or less if the dam were arched (a straight dam, although easier to plot and analyse, is probably the least favorable).

The cost of the watertight component means that this type of dam is less advantageous for low heights.

This alternative uses less material than alternative A but the stress level at the foundation is higher and less uniformly distributed (highest stresses are found at the upstream heel during construction but at the downstream toe when the reservoir is full). D1 therefore needs a better foundation than A and is more vulnerable to earthquakes and to scour at the downstream toe. It may be suitable, for high dams, to flatten the downstream slope in the lower part.

Compared with the conventional gravity dam, this alternative, with its upstream facing, reduces the consequences of internal cracking and pore pressure risk.

D2) Earthfill dams



Alternative D2

This type of design may be applied to dams of moderate height, around thirty metres or so.

The internal watertight barrier might be built in various ways:

- steel plate,
- sheet piling installed before placing fill to remove risk of keys opening while driving,
- thin steel or PVC piles in bentonite slurry trench,
- plastic diaphragm wall.

All these types of core wall could be continued down into the foundation. In some cases, it might be useful to add a fine material on the upstream side to stop local leakage.

There is thus a vast range of possibilities, and cost might be very variable. The average cost of the watertight component is generally of the order of \$US 100-200 per square meter (although some alternatives might be much cheaper) and is relatively independent of site conditions.

On peut admettre un tassement substantiel du remblai ; un drainage doit être prévu si les remblais sont peu perméables :

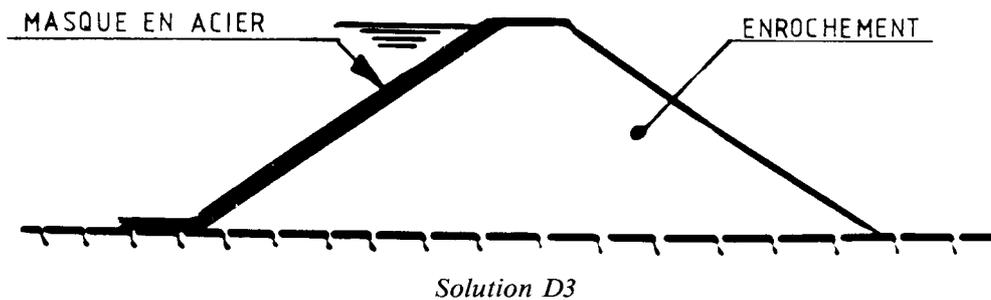
- à l'amont (vidange rapide du réservoir),
- à l'aval (pour évacuer les fuites éventuelles).

Le raccord de l'étanchéité avec la fondation peut poser des problèmes dans certains cas.

D3) Barrages en enrochement

Le barrage en enrochement à masque amont en béton armé (CFRD) est maintenant une solution qui a beaucoup de succès et convient aux très grands barrages.

Il peut être intéressant d'utiliser de l'acier au lieu du béton armé quand un éventuel tassement de la fondation ou du massif en enrochement peut fissurer le masque en béton armé, ou dans le but de réduire le délai total de construction (le masque en acier étant monté en même temps que l'enrochement), ou quand l'enrochement est en contact avec une partie plus rigide du barrage (solution E1 ci-dessous).



E) BARRAGES ZONÉS HORIZONTALEMENT

Le principe peut s'appliquer à de nombreux types de barrages et quelques exemples sont donnés ci-après.

Il consiste à superposer des matériaux différents, le moins cher étant placé sur la fondation, et le plus cher en haut où les pentes des parements peuvent être plus raides.

Les modes de calcul de stabilité peuvent différer des méthodes usuelles.

Substantial settlement of the embankment fill may be accepted; drainage must be provided:

- on the upstream (for reservoir drawdown conditions),
- on the downstream (to discharge any leakage sides).

Connection of barrier with foundation should be studied carefully.

D3) *Rockfill dams*

Rockfill dam with reinforced concrete facing (CFRD) is now a very successful solution which is applying to very high dams.

It may be attractive to use steel instead of reinforced concrete when the possible settlements of foundation or of rockfill may cause cracks in the RC facing or in order to reduce the total construction time (steel facing being placed at the same time as rockfill) or when rockfill part is connected to more rigid part of the dam (alternative E1 hereunder).



Alternative D3

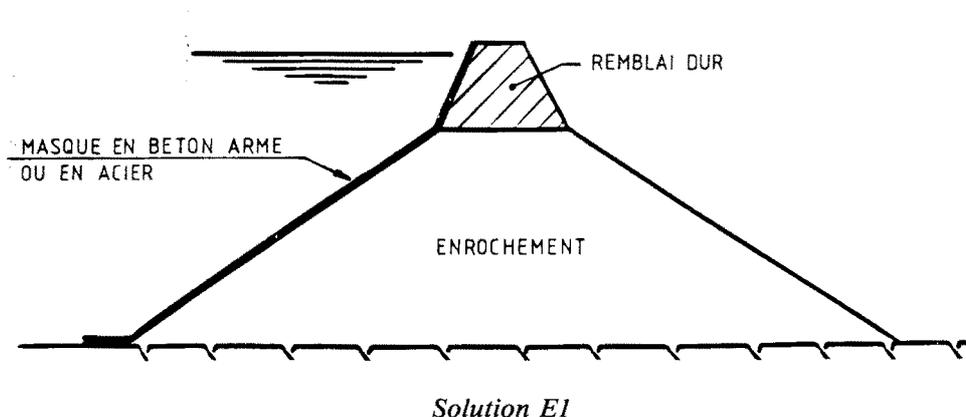
E) *HORIZONTALLY ZONED DAMS*

This principle may apply to many types of dams and some examples are given hereunder.

It consists of a stack of different materials, the cheapest being placed on the foundation, and the most expensive at the top where it can usually be given steeper face slopes.

Structural analysis may be different from usual methods.

E1) Enrochement et remblai dur



Ce principe est un développement du mur vertical en béton de quelques mètres de hauteur, qui est maintenant souvent utilisé pour les barrages en enrochement à masque amont en béton armé.

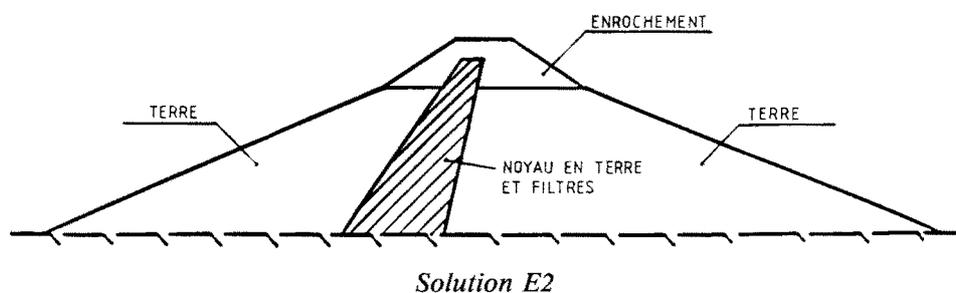
La partie supérieure du barrage est réalisée en remblai dur, au-dessus d'un massif en enrochement, le masque amont étant en béton armé ou en acier.

Pour un site donné, la solution zonée horizontalement devrait être comparée avec les projets classiques utilisant seulement un matériau (voir Annexe II). En plus des économies sur les quantités de matériaux, des économies complémentaires peuvent être réalisées sur la dérivation provisoire et les excavations.

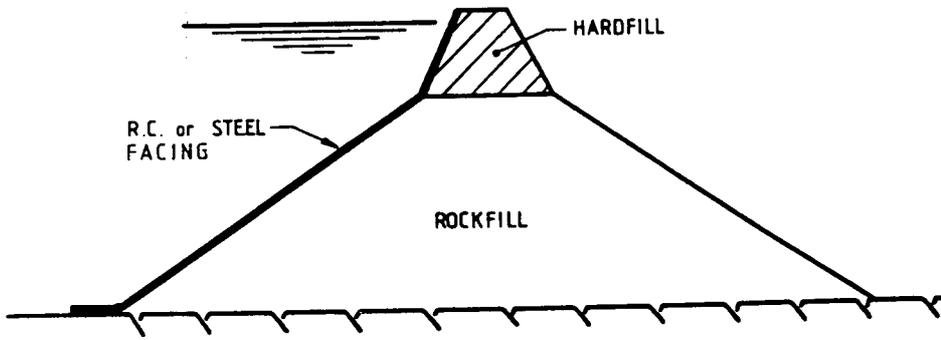
En ce qui concerne la sécurité, le point important sera la qualité des joints dans l'étanchéité au changement de matériau. Cependant, le problème est analogue à ce qu'on rencontre d'habitude dans les barrages classiques au contact avec la fondation. L'enrochement étant drainant, les conséquences d'une fuite éventuelle sont limitées.

E2) Enrochement et terre

Cette solution peut s'appliquer aux barrages à noyau en terre : les recharges sont construites en terre en partie basse, et en enrochement en partie supérieure.



E1) *Associating hardfill and rockfill*



Alternative E1

This principle is a development of the concrete vertical wall some meters high which is now often used at the top of CFRD.

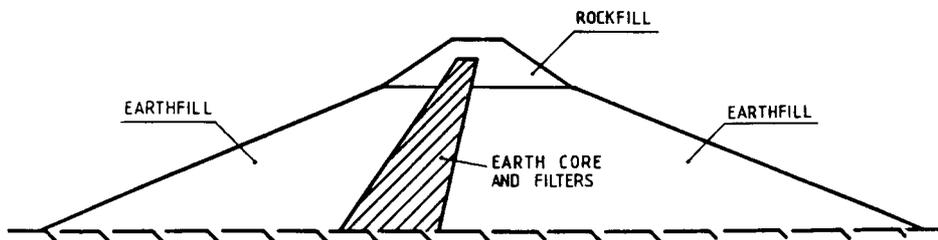
The upper part of the dam is made in hardfill placed on a rockfill base, upstream facing being made in reinforced concrete or steel.

At each site, the horizontally zoned alternative should be compared with the conventional designs using only one material (see Appendix II). In addition to savings on materials quantities, further savings can also be made on river diversion and excavation.

Regarding safety, the crucial point will be the quality of the joints in the water-tight components. Yet the problem is similar to what is experienced in conventional dams at the foundation contact. The free-draining rockfill limits the consequences of any leakage.

E2) *Associating rockfill and earthfill*

This solution may apply to dams with earth core: shoulders are built from earth at the bottom and rockfill at the top.



Alternative E2

F) BARRAGES EN ENROCHEMENT DÉVERSANTS

L'expérience des déversements prévus ou accidentels sur de nombreux barrages en enrochement nous permet d'écarter certaines dispositions, de limiter l'application d'autres, et de développer l'utilisation des plus désirables.

a) En règle générale, permettre le déversement sur un remblai en enrochement ordinaire non protégé, bien que possible en théorie, présente un facteur d'incertitude très important en pratique, du fait de la ségrégation des matériaux, de la concentration de l'écoulement, des risques d'érosion interne, etc., et la destruction du barrage est possible, même pour un débit spécifique de moins de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre linéaire de crête.

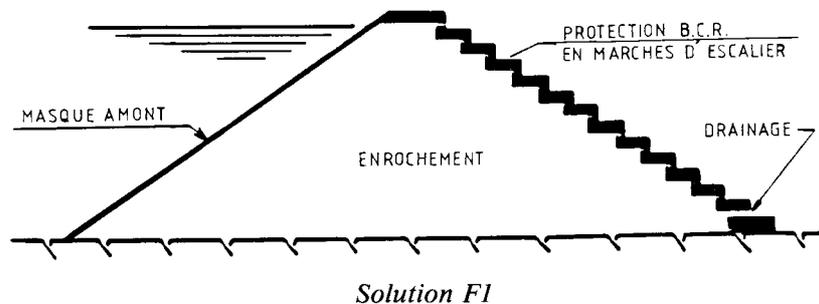
b) Quelques types particuliers de protection ont été étudiés et/ou réalisés pour des hauteurs modérées :

- enrochement armé, utilisé surtout pour le déversement pendant la période de construction (CIGB - Bulletin 48),
- terre armée, avec une économie substantielle de volume,
- gabions métalliques continus soudés, circulaires ou triangulaires (procédé « hydro-orgue » — cf. Pierre Londe, Congrès de Lausanne, Discussion Q59), étudiés pour des remblais en enrochement et en gravier.

c) Trois types de protection du talus aval peuvent être appliqués à de nombreux barrages et à de grands débits :

— Divers essais réussis ont été basés sur des protections du talus aval en béton armé ou bitumineux, pour des débits spécifiques allant jusqu'à $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; des revêtements en béton armé minces, réalisés en coffrage glissant, ont été utilisés pour plusieurs barrages récemment. Cette approche peut cependant être mise en question pour de grands débits et de très grands barrages, compte tenu du risque de cavitation. Des revêtements en acier pourraient permettre d'aller plus loin dans ce sens.

— Quelques barrages de faible hauteur ont été protégés à l'aval avec du BCR (aux USA), comme les barrages en BCR à parement aval en marches d'escalier permettant de déverser de manière satisfaisante. Une approche prometteuse (solution F1) consiste à prévoir quelques mètres de BCR en marches d'escalier en parement aval, pouvant être armé horizontalement pour contrôler la fissuration. Il est préférable de limiter le débit spécifique à $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et de vérifier sur modèle que l'essentiel de l'énergie est bien dissipé par les marches.



F) OVERSPILL ROCKFILL DAMS

Experience from the planned or accidental overtopping of many rockfill dams enables us to discard some arrangements, limit the use of others, and develop the application of desirable features.

a) As a general rule, allowing water to spill down ordinary, unprotected rockfill, although possible in theory, involves a very high contingency factor in practice because of segregation of the materials, concentration of the flow, risks of internal erosion, etc. and destruction of the dam is possible, even for a specific discharge of less than $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ per metre of crest length.

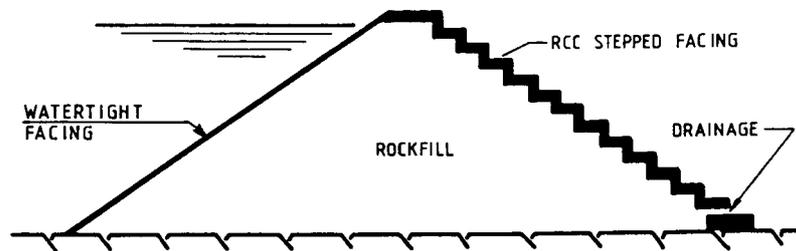
b) Some special types of protection have been studied and/or built for moderate heights:

- reinforced rockfill, used chiefly for spilling during the construction period (ICOLD Bulletin 48),
- reinforced earth, with substantial saving on volume,
- circular or triangular welded continuous steel gabions (“hydro-orgue” system — cf. Pierre Londe, Discussion Q59, Lausanne Congress) studied for rockfill and gravel structures.

c) Three types of downstream facing are suitable for many dams and large flows:

— Various successful trials have been based on reinforced or bituminous concrete downstream facings for specific discharges of up to $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; thin, slip formed concrete spillway facings, reinforced to minimize cracking and ensure monolithic behaviour, have been used in several dams in recent years. This approach could however be questionable for large flows and very high dams because of the risk of cavitation. Steel facings might enable the idea to be carried further.

— A few low dams have been faced with RCC (in USA), as RCC dams with stepped downstream faces spill satisfactorily. A promising approach (alternative F1) is to apply a few meters of RCC stepped down the face, possibly reinforced with horizontal bars to control cracking. To dissipate the energy by turbulence over the steps, it is wise to limit specific discharge to less than $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and to check spilling through hydraulic model test.

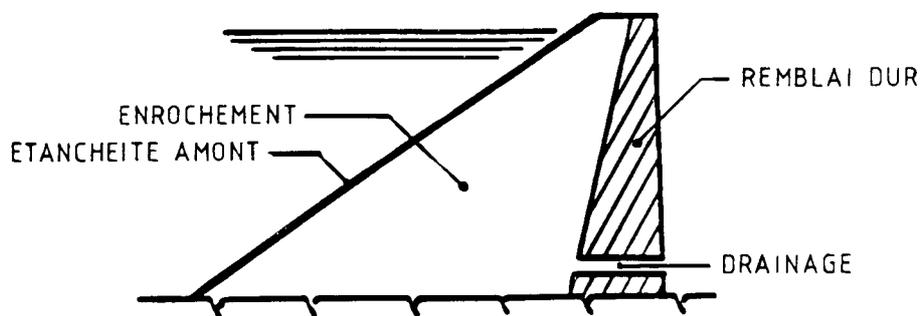


Alternative F1

Le coût d'une telle protection est modéré, et il est possible de réduire substantiellement la cote de la crête du barrage, ce qui fait que l'économie sur les quantités compense en partie le prix de la protection. Cette approche paraît également intéressante, en la combinant avec un évacuateur de crue vanné, dont la capacité peut être réduite. La protection aval pourrait être limitée uniquement à la partie centrale du barrage, la crête étant montée légèrement plus haut sur chaque rive. Cette solution permet le passage des crues pendant la construction (cf. Congrès de San Francisco - Discussion Q62, Barry Cooke).

Ce type de projet est intéressant au point de vue coût et sécurité pour des hauteurs modérées, l'extension à de hauts barrages n'étant envisageable que progressivement. Il est essentiel que le drainage de la protection en BCR soit bien dimensionné et assuré de manière fiable.

— La solution F2 peut s'appliquer à des débits spécifiques élevés. L'étanchéité est assurée par un masque amont (en béton armé ou en acier) ou par un noyau incliné, et le mur aval, qui n'est pas exposé à la pression hydrostatique amont, peut être réalisé en remblai dur dans les pays industriels, et en maçonnerie dans les pays où le coût de la main-d'œuvre est bas (il existe en Chine des exemples jusqu'à 30 m de hauteur en pierres sèches, mais pour de faibles débits). Le mur peut être droit ou arqué ; la crête peut comporter un seuil déversant projetant l'eau à l'aval, ou peut être équipée, soit de vannes conventionnelles, soit de vannes fusibles ou gonflables. Cette solution a besoin d'une fondation rocheuse ; elle peut accepter un déversement pendant la période de construction moyennant quelques précautions complémentaires.



Solution F2

G) SOLUTION G

Certains barrages n'ont pas besoin d'être étanches, par exemple :

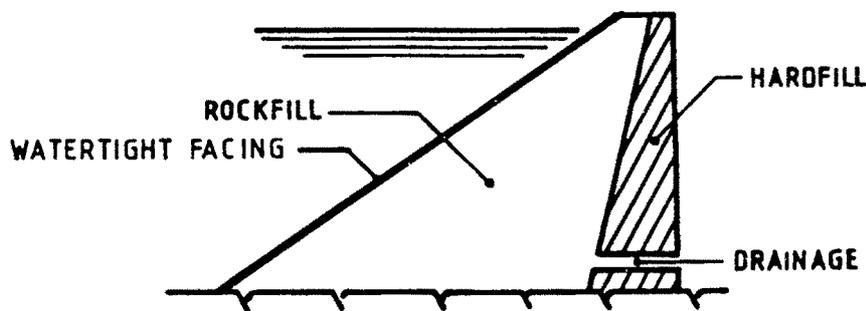
- les écrêteurs de crues (qui représentent 5 % du nombre total de grands barrages),
- ceux relâchant un débit réservé substantiel à l'aval.

Ils peuvent tolérer des fuites de plusieurs centaines de litres par seconde ou plus (perméabilité moyenne de 10^{-4} m/s).

Cost of such a facing is moderate and enables the dam crest to be substantially lowered, the saving on quantities partly counterbalancing the cost of the facing. This approach also appears attractive in combination with a gated spillway, whose capacity can thus be smaller. The downstream facing could be confined to only the central part of the dam, with the wings topped out slightly higher. This solution is suitable for passing floods during construction (cf. Barry Cooke, Discussion Q62, San Francisco Congress).

This type of design offers good prospects in terms of cost and safety for moderate heights. It is essential that drainage of the RCC lining be well dimensioned and reliable. As it is probable that cracks in RCC shall not be completely avoided, this solution should be used only for low to medium height dams.

— Alternative F2 might be suitable for large specific discharges. Watertightness is provided by an upstream facing (reinforced concrete or steel) or a sloping core, and the downstream wall, which is not exposed to water pressure, could be hardfill in industrial countries and jointed or even dry-stone masonry in low cost labour countries (there are examples in China up to 30 m high with dry-stone masonry and small flows). The wall could be straight or arched, the crest could have an overspill sill throwing the water downstream, or could be fitted with conventional gates, inflatable weirs or fuse gates. This alternative requires a rock foundation; it could accept spilling over most of the construction period if some extra precautions were taken.



Alternative F2

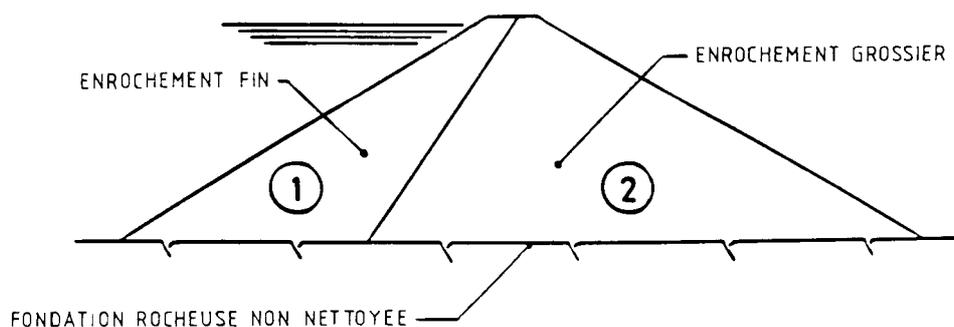
G) ALTERNATIVE G

Some dams need not be watertight, such as:

- those built for flood control (they represent 5 per cent of total number of large dams),
- those releasing a substantial compensation flow downstream.

They can tolerate leakage of several hundred litres/second or more (mean permeability about 10^{-4} m/s).

Pour de tels ouvrages on peut s'inspirer des dispositions adoptées pour les batardeaux provisoires, avec seulement deux zones, la zone aval ayant la perméabilité la plus forte de façon que les matériaux ne soient pas entraînés par les fuites.



Solution G

Le matériau de la zone 2 doit se comporter comme filtre pour la zone 1. Dans de nombreux cas, on peut se dispenser de la plupart du traitement de la fondation. La construction sera très rapide. La sécurité doit être assurée par un zonage correct.

Le coût total de la solution G représente environ la moitié de celui d'une solution classique.

Cette solution ne peut pas s'appliquer à des fondations meubles ou rocheuses très fracturées, mais, d'un autre côté, le nettoyage ou la préparation de surface ne sont pas nécessaires, et la mise à sec peut souvent être évitée.

Le calcul de stabilité doit tenir compte d'une saturation partielle de l'enrochement.

CONCLUSIONS

Les 12 exemples décrits peuvent être modifiés d'un grand nombre de façons, les proportions montrées sur les dessins étant seulement indicatives.

Deux types, par exemple déversant et non déversant, peuvent être combinés sur un même ouvrage (par exemple, B1 et B2).

Les matériaux utilisés sont généralement soumis à des niveaux de contraintes plus faibles que dans les ouvrages classiques.

Sur ces douze solutions :

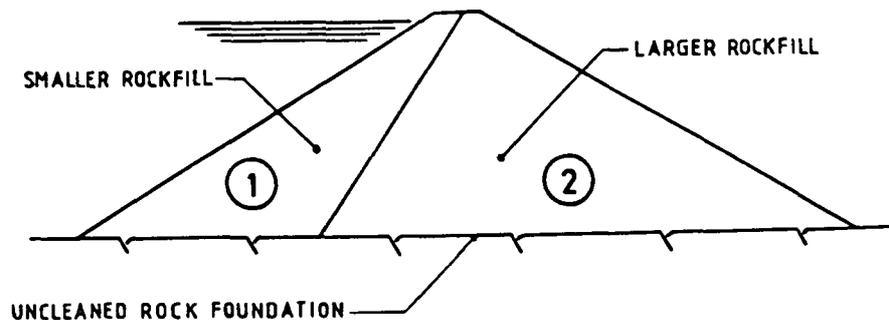
- sept utilisent du remblai dur qui est un béton compacté au rouleau conçu pour des contraintes faibles et sans étanchéité dans la masse ; cinq de ces solutions associent du remblai dur et de l'enrochement ou de la terre ;

- quatre utilisent du béton armé ou de l'acier pour étanchéité ;

- trois sont des projets inhabituels avec des remblais classiques.

Ces barrages devraient bien sûr être instrumentés, de la même façon qu'il est maintenant universellement accepté que les barrages classiques doivent l'être.

For such structures, one can look to the types of arrangements used for temporary cofferdams having only two zones, the downstream zone having the higher permeability so that the material is not washed away by leakage.



Alternative G

The material in zone 2 must act as a filter for zone 1. Most of foundation treatment could be dispensed with in many cases. Such a dam would be very quick to build. Safety must be ensured by correct zoning.

The total cost of alternative G could be around half that of a conventional structure.

This solution cannot apply to soil foundation or to very faulted rock foundation, but, otherwise, cleaning or surface preparation are not necessary and dewatering may be often avoided.

The stability analysis must take in account a partial saturation of the rockfill.

CONCLUSIONS

The twelve examples described can be modified in a number of ways, the proportions shown in the drawings being only indicative.

Two types, say an overspill and non-overspill design, might be combined in a single structure (for example, B1 and B2).

The materials used are familiar to engineers and are generally exposed to stress levels lower than in conventional structures.

Of the twelve alternatives:

- seven make use of hardfill which is a roller compacted concrete designed for low stresses and not watertight; five of these alternatives combine hardfill and rock or earthfill,

- four use reinforced concrete or steel for watertightness,

- three are unusual designs based on conventional fill.

These dams must of course be instrumented, in the same way as it is now universally accepted that conventional dams must be.

ANNEXE II

Le but de cette Annexe est d'apprécier l'ordre de grandeur des gains, mais ces gains peuvent varier considérablement suivant les pays, les sites, la fondation, etc.

Les économies peuvent être importantes pour toutes les solutions présentées dans l'Annexe I, mais les comparaisons ci-dessous ne s'appliquent qu'à un ou quelques exemples pour chaque gamme de hauteur (on a choisi des exemples permettant une comparaison facile) : *ce ne sont donc pas nécessairement les plus économiques.*

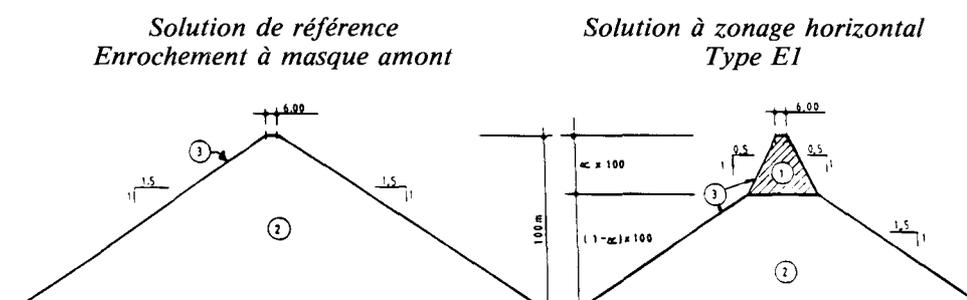
Les comparaisons sont faites pour des sections types dont la hauteur représente sensiblement la hauteur moyenne des barrages de la catégorie considérée.

1. OUVRAGES DE PLUS DE 100 M DE HAUTEUR

Les comparaisons sont faites pour une section de 100 mètres de hauteur.

1.1. Comparaison d'un barrage à zonage horizontal (solution E1) avec un barrage classique en enrochement à masque amont

La comparaison ci-dessous porte sur le corps du barrage qui représente généralement, pour ces hauteurs, près de 60 % du coût total.



- (1) Remblai dur
- (2) Enrochement
- (3) Masque amont

En considérant les prix unitaires suivants, exprimés en US dollars,

— enrochement = 10 USD/m³ prix moyen

— remblai dur = $n \times$ prix enrochement

— masque amont = 200 USD/m² dans les deux solutions

on obtient les coûts suivants pour le corps du barrage pour un mètre linéaire.

APPENDIX II

The purpose of this Appendix is to appreciate the range of magnitude of possible savings. These savings may vary considerably according to country, site, foundations...

The savings may be important for all solutions presented in Appendix I, but the following comparisons concern only one or a few examples for each height range (the examples have been chosen for convenient comparison *and are not necessarily the most economical designs*).

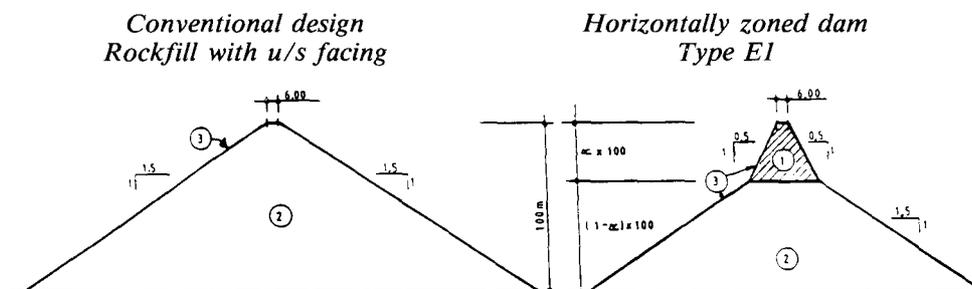
Comparisons are based on typical cross sections whose heights more or less represent the average height of the dams in the relevant range.

1. DAMS MORE THAN 100 M MAXIMUM HEIGHT

The comparisons are made on cross sections 100 m high (dam average height).

1.1. Comparison between horizontally zoned dam (alternative E1) and conventional rockfill dam with upstream facing (CFRD)

In this example, the dam body usually represents nearly 60 per cent of the total cost in this height range.



- (1) Hardfill
- (2) Rockfill
- (3) U/S facing

Unit costs are taken as follows, in US Dollars :

- Rockfill = \$10/m³ average
- Hardfill = rockfill cost × n
- U/S facing = \$200/m² in both solutions

Calculated costs are as follows, per linear metre of dam body:

— *Barrage classique en enrochement à masque amont*

$$\begin{aligned} \text{enrochement} &= 15\,600 \times 10 = 156\,000 \text{ USD} \\ \text{masque amont} &= 180 \times 200 = \underline{36\,000} \\ \text{p1 total} &= \underline{192\,000 \text{ USD/ml}} \end{aligned}$$

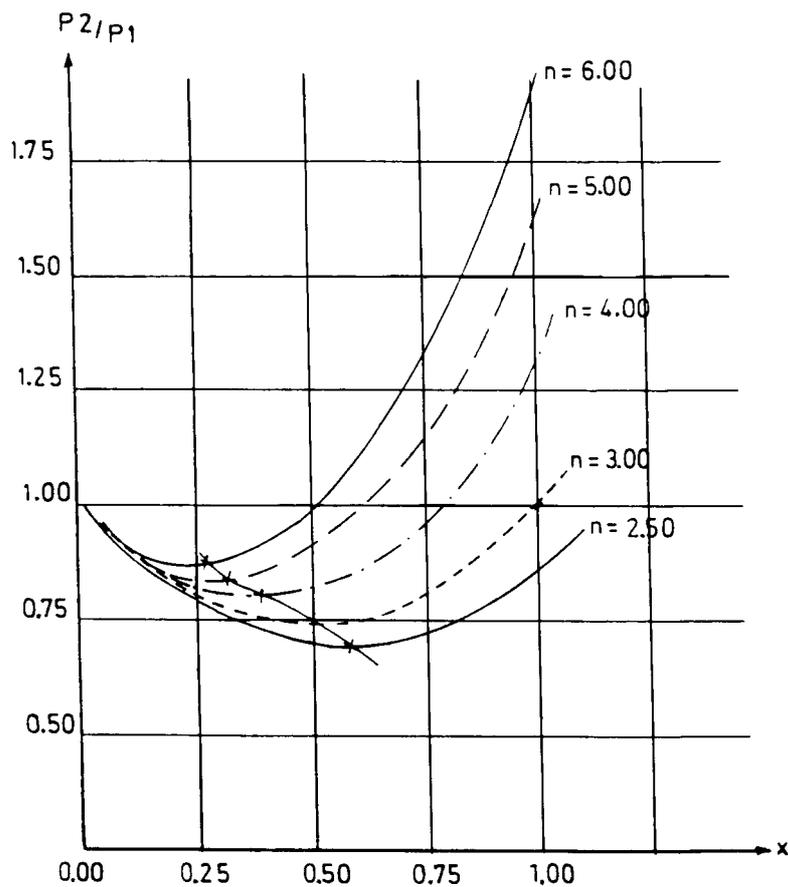
— *Barrage à zonage horizontal (solution E1)*

$$\begin{aligned} \text{enrochement (prix moyen)} &= (15\,600 - 20\,600x + 5\,000x^2) 10 \\ \text{remblai dur} &= (5\,000x^2 + 600x) \times n \times 10 \\ \text{masque amont} &= \underline{111,8x \times 200 + 180,3(1-x) \times 200} \\ \text{p2 total} &= 192\,000 - (220\,000 - 6\,000n)x \\ &\quad + 50\,000(1+n)x^2 \end{aligned}$$

Le rapport des coûts du corps du barrage p_2/p_1 , en fonction de n et x , s'exprime donc par la relation :

$$p_2/p_1 = 1 - (1,15 - 0,03n)x + 0,26(1+n)x^2$$

Le graphique suivant donne les valeurs de p_2/p_1 , en fonction de x pour $n = 2,5$ à 6 , soit une fourchette de prix du remblai dur comprise entre 25 et 60 USD.



— *Conventional rockfill dam with upstream facing (CFRD):*

rockfill: $15\,600 \times 10 = 156\,000$
 facing: $180 \times 200 = \underline{36\,000}$
 p1 total $\qquad\qquad\qquad \$ 192\,000/\text{m}$

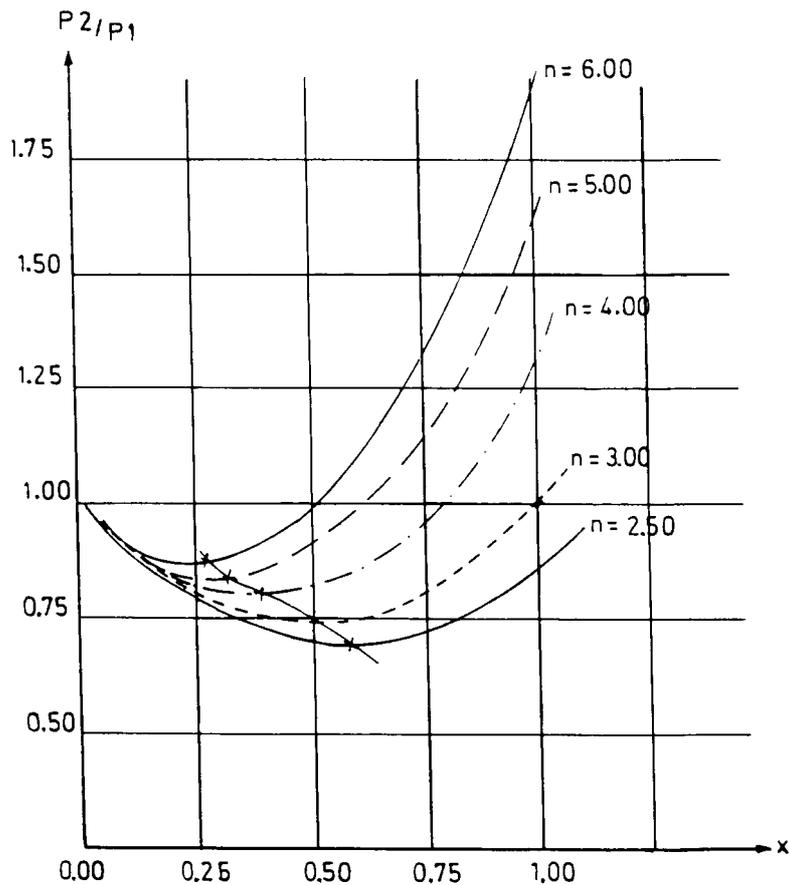
— *Horizontally zoned dam (Alternative E1):*

rockfill (average cost) = $(15\,600 - 20\,600x + 5\,000x^2) 10$
 hardfill $\qquad\qquad\qquad = (5\,000x^2 + 600x) \times n \times 10$
 U/S facing $\qquad\qquad\qquad = \underline{111.8x \times 200 + 180.3(1-x) \times 200}$
 p2 total $\qquad\qquad\qquad = 192\,000 - (220\,000 - 6\,000n)x + 50\,000(1+n)x^2$

The relationship between the dam body costs $p2/p1$ as a function of n and x , can thus be written:

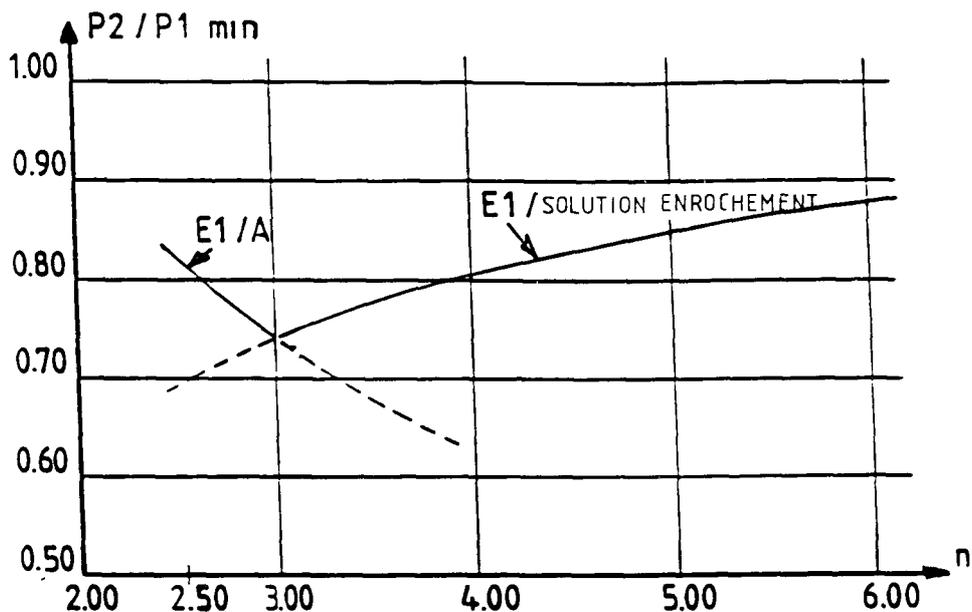
$$p2/p1 = 1 - (1.15 - 0.03n)x + 0.26(1+n)x^2$$

The following graph plots $p2/p1$ versus x for $n = 2.5$ to 6 , i.e. a hardfill unit cost range of \$ 25 to \$ 60.



Un barrage tout en enrochement est moins cher qu'un barrage tout en remblai dur (valeur de $p_2/p_1 > 1$ pour $x = 1$) tant que n est supérieur à 3,00.

La courbe ci-dessous donne le coût minimal en fonction de n , ratio du prix du remblai dur par rapport au prix des enrochements.



Pour des valeurs usuelles du prix unitaire du remblai dur par rapport au prix unitaire des enrochements ($n = 3$ à 4), l'économie apportée sur le coût du corps du barrage par la solution à zonage horizontal (E1) est de l'ordre de 20 à 25 %, par rapport à la solution classique de référence enrochement à masque amont. La valeur de x est alors de 0,40 à 0,50.

Les raccordements du déversoir avec le corps du barrage étant plus faciles à réaliser dans la solution E1, on peut considérer que l'économie sur le déversoir serait comprise entre 10 et 20 %.

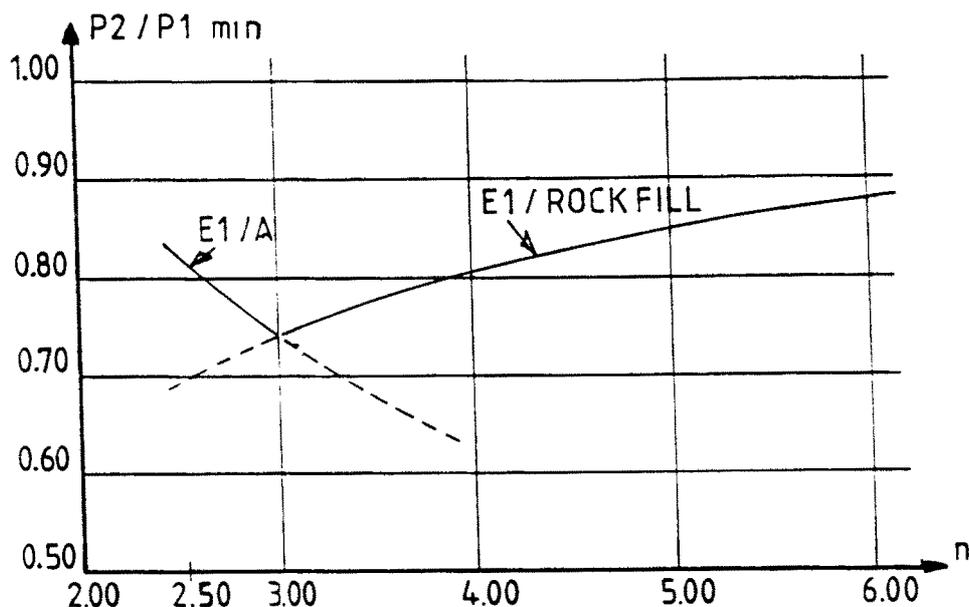
L'empiètement du barrage étant réduit, l'économie sur les fouilles du barrage sera de l'ordre de 10 à 20 %, et celle sur la dérivation sera de 10 à 15 %.

Globalement, on peut donc estimer l'économie apportée par la solution E1 à :

- corps du barrage = $0,25 \times 0,60 = 0,15$
 - autres travaux = $0,125 \times 0,40 = 0,05$
- 20 % environ

It can be seen that an all-rockfill dam is less costly than an all-hardfill dam ($p_2/p_1 > 1$ for $x = 1$) for values of n above 3.00.

The following graph plots the minimum cost as a function of n , the hardfill/rockfill cost ratio.



For the usual levels of hardfill/rockfill unit cost ratios ($n = 3$ to 4), the saving offered on the cost of the dam body by the horizontally zoned alternative (E1) is of the order of 20 to 25 per cent as compared with the conventional rockfill design with upstream facing. The value of x is then 0.40 to 0.50.

Since the interfaces between the spillway and dam are easier with alternative E1, the saving on the spillway can be taken as lying between 10 and 20 per cent.

Since the dam base width is smaller, the saving on foundation excavation would be of the order of 10-20 per cent, plus 10-15 per cent on temporary diversion works.

The total cost saving from alternative E1 can be estimated as:

— dam body: $0.25 \times 0.60 = 0.15$

— other works: $0.125 \times 0.40 = 0.05$

20% approx.

1.2. Comparaison d'un barrage en remblai dur à masque amont acier (solution D1) avec un barrage-poids classique

La différence de prix unitaire entre le remblai dur et le béton conventionnel a été prise égale à 50 %. Le surcoût d'un masque acier par rapport à un coffrage équivalent à peu près à 1,5 m³ de béton conventionnel, soit moins de 5 % du corps du barrage conventionnel.

L'économie sur le corps du barrage peut être ainsi estimée à 45 % ; comme le corps du barrage en béton représente près des 2/3 de l'investissement, l'économie globale paraît de l'ordre de 30 %.

Cette évaluation ne tient pas compte de la participation de la tôle d'étanchéité à la résistance de la structure, ce qui accroît beaucoup la sécurité, ou pourrait permettre, à sécurité égale, de réduire l'épaisseur de l'ouvrage.

La solution D1 peut être envisagée si la fondation est rocheuse et de bonne qualité. Si le module d'élasticité du rocher est plus faible, il pourrait être nécessaire d'adoucir la pente du talus aval en partie basse.

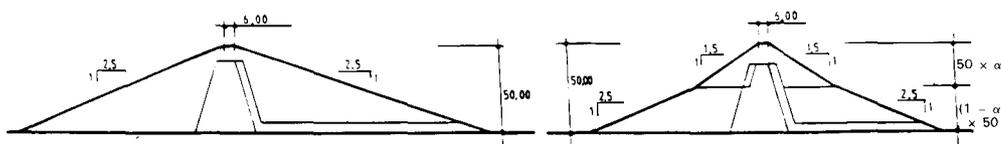
2. BARRAGES ENTRE 30 ET 100 M DE HAUTEUR

On a pris en compte une hauteur moyenne de 50 mètres.

2.1. Barrage en terre à zonage horizontal (solution E2) comparé à un barrage en terre à noyau

*Solution de référence
Terre*

*Solution à zonage horizontal
Type E2*



Si n est le rapport entre le prix unitaire de l'enrochement et le prix unitaire de la terre des recharges, le ratio entre le coût du corps du barrage dans la solution E2 (p_2) et celui du corps du barrage dans la solution terre classique (p_1) est :

$$p_2/p_1 = \frac{6\,550 - 5\,300x - 1\,250x^2}{6\,550} + \frac{(300x + 3\,750x^2)n}{6\,550}$$

$$p_2/p_1 = 1 + \frac{300n - 5\,300}{6\,550}x + \frac{3\,750n - 1\,250}{6\,550}x^2$$

1.2. Comparison between hardfill dam with steel upstream facing (alternative D1) and conventional gravity dam

The unit cost difference between hardfill and conventional concrete is taken here as being 50 per cent. The higher cost of a steel facing as compared with shuttering is roughly equivalent to 1.5 m³ conventional concrete, i.e. less than 5 per cent of the conventional dam body.

The saving on the dam body would therefore be 45 per cent; since the body of the concrete dam represents around two-thirds of the capital cost, the total saving would be 30 per cent.

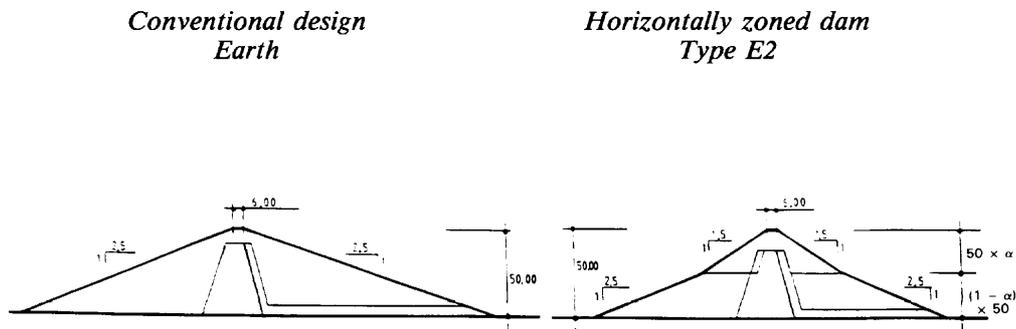
This estimate ignores any contribution from the steel facing to structural strength which increases the safety margin or enables the dam width to be reduced without affecting safety.

Alternative D1 applies to good rock foundations. If rock modulus is lower, it may be necessary to flatten the downstream slope in the lower part.

2. DAMS BETWEEN 30 M AND 100 M MAXIMUM HEIGHT

A mean height of 50 m is considered.

2.1. Horizontally zoned earth dam (alternative E2) compared with earth dam with watertight core

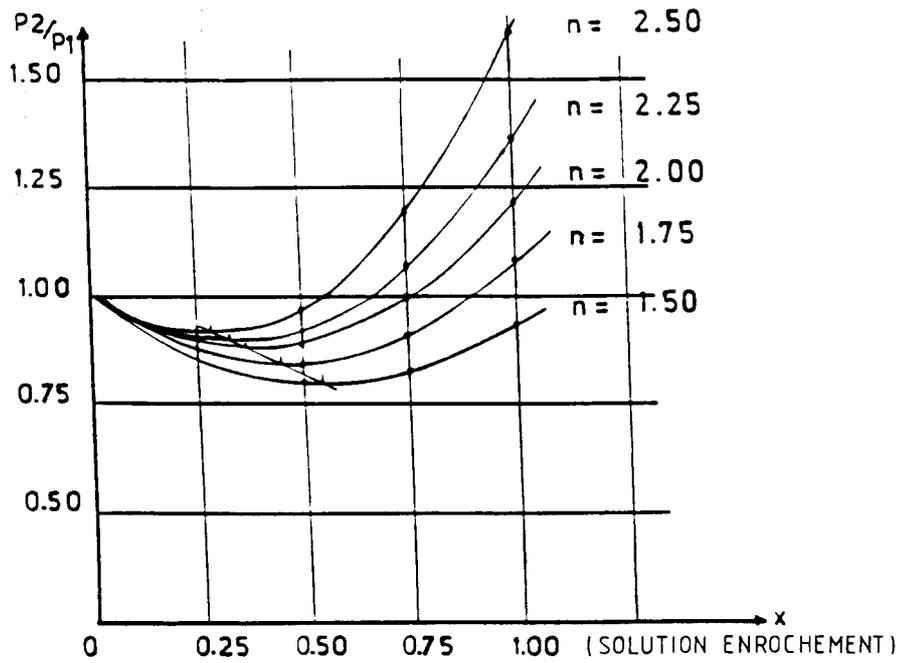


If n is the ratio between unit cost of rockfill and unit cost of earth in the dam shoulders, then the ratio between the cost of the dam body in alternative E2 (p_2) and the cost of the conventional earth dam body (p_1) is:

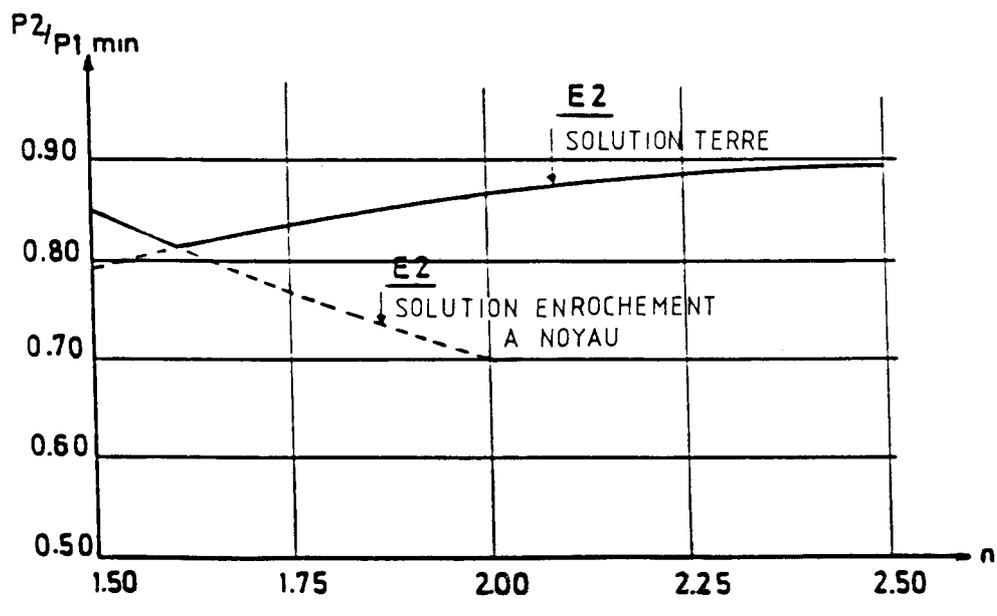
$$p_2/p_1 = \frac{6\,550 - 5\,300x - 1\,250x^2}{6\,550} + \frac{(300x + 3\,750x^2)n}{6\,550}$$

$$p_2/p_1 = 1 + \frac{300n - 5\,300}{6\,550}x + \frac{3\,750n - 1\,250}{6\,550}x^2$$

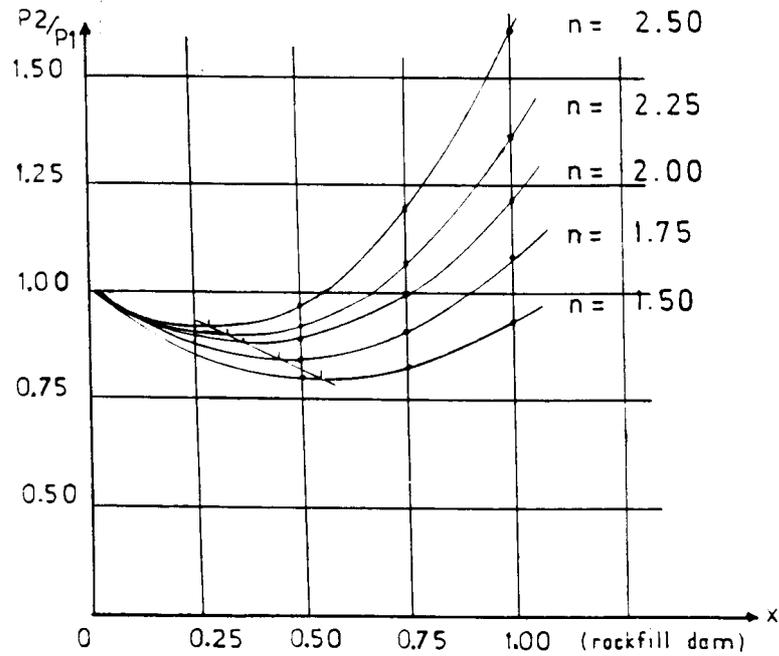
Le graphique ci-après donne les valeurs de p_2/p_1 en fonction de x pour n variant de 1,50 à 2,50.



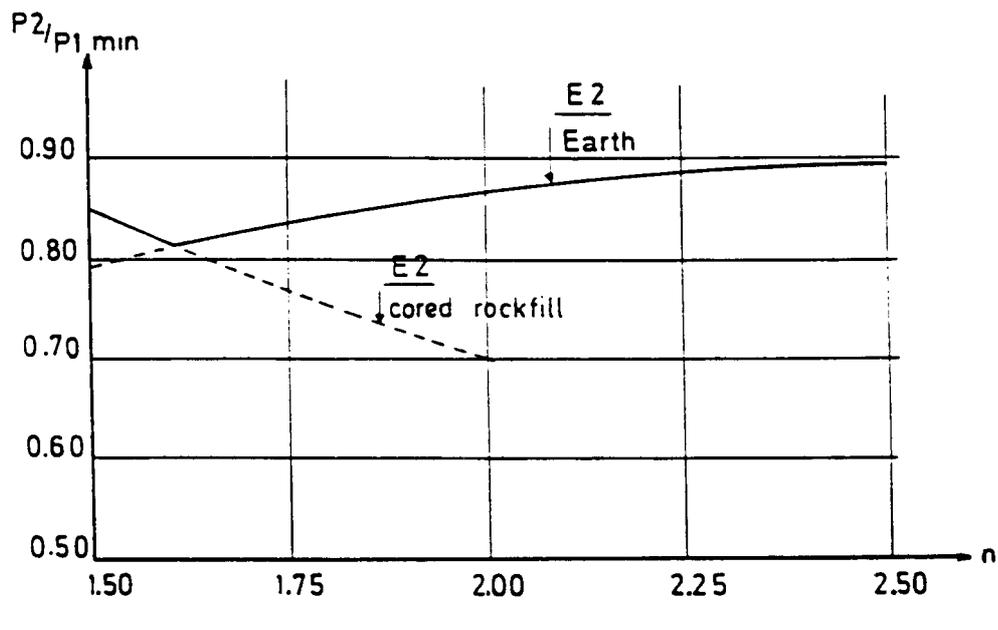
La courbe ci-dessous donne les valeurs minimales de p_2/p_1 en fonction de n , ratio du prix de l'enrochement par rapport au prix de la terre.



The following graph shows p_2/p_1 versus x for $n = 1.50$ to 2.50



The following graph plots minimum values of p_2/p_1 versus n (rockfill/earthfill cost ratio).



Pour des valeurs usuelles de ce ratio ($n = 2,00$), l'économie apportée sur le coût du corps du barrage par la solution à zonage horizontal (E2) est de l'ordre de 10 à 20 % par rapport à la solution classique en remblai la moins chère, pour cette gamme de hauteur. La valeur de x est alors de 0,30 à 0,40.

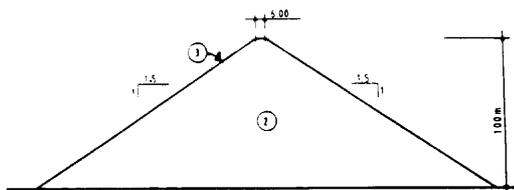
La prise en compte dans une comparaison plus détaillée des filtres et drains et de la protection amont contre le batillage ne devrait pas avoir d'incidence globale sensible sur les résultats précédents.

2.2. Barrage en remblai dur à masque amont acier (solution D1) comparé à un barrage-poids classique

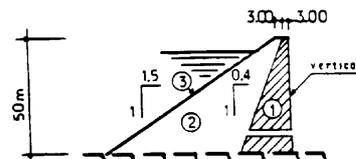
La comparaison est la même que pour les barrages de plus de 100 m de hauteur, mais le pourcentage d'économie globale est un peu plus faible (15 à 30 %).

2.3. Barrage en enrochement déversant (solution F2) comparé à un barrage en enrochement classique à masque amont

Barrage en enrochement classique à masque amont



Barrage en enrochement déversant type F2



La solution F2 avec un parement aval en remblai dur et un masque amont d'étanchéité nécessite pour sa réalisation :

$$(3 + 0,40 \times 50/2) \times 50 = 650 \text{ m}^3/\text{m de remblai dur}$$

$$[3 + (1,5 - 0,40) \times 50/2] \times 50 = 1\,525 \text{ m}^3/\text{m d'enrochement}$$

au lieu de $[6 + (2 \times 1,50 \times 50/2)] \times 50 = 4\,050 \text{ m}^3/\text{m d'enrochement}$ pour la solution de référence enrochement à masque amont.

Si l'on considère que le prix du masque amont est équivalent dans les 2 solutions, le rapport entre les coûts du corps du barrage au mètre linéaire dans la solution F2 (p_2) et dans la solution de référence (p_1) est (avec n , ratio entre le prix unitaire du remblai dur et celui de l'enrochement) :

$$p_2/p_1 = (1\,525 + 650 n) / 4\,050$$

Ce rapport est inférieur à 1 si n est inférieur à 3,9.

Pour le prix unitaire normal du remblai dur ($n = 4$), le massif aval en remblai dur coûte sensiblement le même prix que la recharge aval en enrochement qu'il remplace.

Mais, la solution F2 permet de se dispenser de l'évacuateur de crue séparé nécessaire dans la solution de référence et qui représente souvent 20 à 30 % du coût total du projet.

For the usual values of this ratio ($n = 2.00$), the saving offered on the cost of the dam body by the horizontally zoned dam (alternative E2) is of the order of 10 to 20 per cent on the lowest cost of the conventional embankment dam in this height range. The value of x is then 0.30 to 0.40.

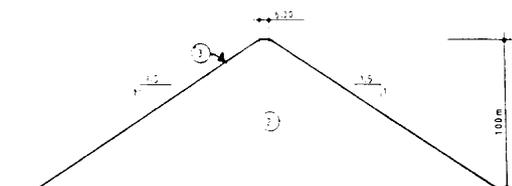
Including the impact of the filters and drains, and the wave protection to the upstream face in a more detailed comparison should not significantly affect these findings.

2.2. Hardfill dam with steel facing (alternative D1) compared with conventional gravity dam

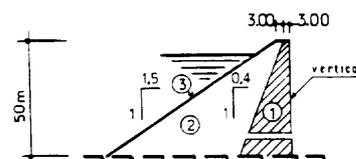
The comparison is the same as for dams higher than 100 m but the total percent saving is slightly lower at 15-30 per cent.

2.3. Overspill rockfill dam (alternative F2) compared with conventional rockfill dam with upstream facing

*Conventional design
Rockfill with u/s facing*



*Overspill rockfill dam
Type F2*



Alternative F2 with hardfill downstream facing and upstream watertight facing requires for construction:

$$(3 + 0.40 \times 50/2) \times 50 = 650 \text{ m}^3/\text{m} \text{ hardfill}$$

$$[3 + (1.5 - 0.40) \times 50/2] \times 50 = 1\,525 \text{ m}^3/\text{m} \text{ rockfill}$$

instead of $[6 + (2 \times 1.50 \times 50/2)] \times 50 = 4\,050 \text{ m}^3/\text{m}$ rockfill in a conventional faced rockfill dam.

Taking the cost of the watertight facing as roughly equivalent in both alternatives, the ratio between the dam cost per linear metre in alternative F2 (p_2) and the dam cost per linear metre in the conventional design (p_1) is (n is the hardfill/rockfill unit cost ratio):

$$p_2/p_1 = (1\,525 + 650 n)/4\,050$$

The ratio is lower than unity when n is lower than 3.9.

With the usual hardfill cost ($n = 4$), the hardfill costs about the same as the downstream shoulder rockfill which it replaces.

However alternative F2 dispenses with the separate spillway required in the conventional design, which represents often 20-30 per cent of the total project cost.

Arquer le massif aval en remblai dur devrait permettre d'augmenter encore l'économie.

2.4. Barrages écrêteurs de crues (solution G)

Dans le cas d'un barrage en enrochement classique, la répartition globale de coût est très approximativement la suivante :

- déversoir (20 ‰)
- maîtrise des crues pendant les travaux, excavations, traitement de la fondation (30 ‰)
- enrochement (40 ‰)
- masque ou plus-value pour noyau et filtres (10 ‰).

La réalisation d'une solution non étanche en enrochement (solution G) ne modifie pas le coût du déversoir, mais permet de réduire de façon très importante la maîtrise provisoire de la rivière (absence de batardeaux), les excavations dont on peut supprimer l'essentiel et notamment les problèmes de nettoyage, et enfin le traitement de la fondation. Une économie de $50 ‰ \times 30 ‰ = 15 ‰$ du total est réaliste.

On économise par ailleurs le coût du masque (10 ‰), et enfin les spécifications concernant l'enrochement peuvent être fortement réduites permettant une économie de l'ordre de : $25 ‰ \times 40 ‰ = 10 ‰$,

soit une économie totale de : $15 ‰ + 10 ‰ + 10 ‰ = 35 ‰$, plus probablement proche de 40 ‰, compte tenu du gain financier dû à la réduction du délai de construction.

La comparaison par rapport à un barrage en terre ou en béton devrait conduire à une économie supérieure.

3. OUVRAGES DE MOINS DE 30 M

Une hauteur moyenne de 20 mètres a été prise en compte.

Solution B1 comparée à un barrage en terre (fondation rocheuse)

La comparaison a été faite pour des ouvrages où le débit à évacuer est compris entre 100 et 1 000 m³/s, le déversoir étant en général un seuil latéral non vanné dans la solution de référence.

a) La solution classique de référence est un barrage en terre où le coût du corps du barrage représente environ 50 ‰ du coût total du projet.

Pour une hauteur de 20 m, le volume de terre du barrage peut être estimé à 1 120 m³/ml.

Le coût total de l'ouvrage de référence représente donc, pour un prix moyen de terre de 7 à 9 USD/m³ (filtres et drains inclus) :

$$1\ 120 \times (7 \text{ à } 9) \times 2 = 15\ 700 \text{ à } 20\ 200 \text{ USD/ml de vallée}$$

b) La solution alternative B1 permettant le déversement en crête du barrage aura une hauteur limitée à 17 m au lieu de 20 m puisqu'elle est déversante.

Arching the downstream hardfill would further increase the saving.

2.4. Flood control dams (alternative G)

With a conventional rockfill dam, the breakdown of cost components is very approximately:

- spillway (20%)
- diversion, excavation and foundation treatment (30%)

- rockfill (40%)
- facing or extra cost for core and filters (10%).

A pervious rockfill alternative (G) would not affect the spillway cost but would very greatly reduce the requirements for river diversion during construction (no cofferdams), excavation (most of which could be dispensed with including cleaning problems) and foundation treatment. A saving of $50\% \times 30\% = 15\%$ of the total is a realistic estimate.

The cost of the facing would also be saved (10%) and, furthermore, the rockfill specification could be considerably relaxed, producing a saving of the order of $25\% \times 40\% = 10\%$,

making a total saving of $15\% + 10\% + 10\% = 35\%$, more likely to be nearer 40 per cent considering the financial savings due to the shorter construction time.

Comparison with an earth or concrete dam should result in an even greater economy.

3. DAMS LESS THAN 30 M MAXIMUM HEIGHT

A mean height of 20 m is considered.

Alternative B1 compared with an earth dam (rock foundation)

The comparison is made for dams with a discharge requirement of between $100 \text{ m}^3/\text{s}$ and $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, the spillway usually being an ungated side channel type in conventional designs.

a) The basic conventional arrangement is an earth dam, the cost of the dam body representing about 50 per cent of the total project cost.

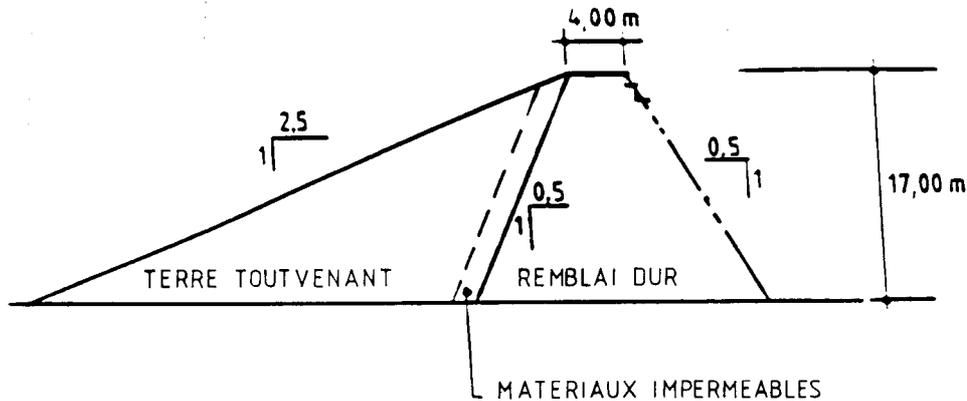
Earthfill volume for a dam height of 20 m can be estimated at $1\,120 \text{ m}^3/\text{m}$.

The total cost of the conventional design thus represents, with an average earthfill cost of $\$ 7\text{-}9/\text{m}^3$ (including drains and filters):

$1\,120 \times (7 \text{ to } 9) \times 2 = \$ 15\,700 \text{ to } 20\,200/\text{linear metre valley width}$.

b) Alternative B1 can spill so that the crest can be topped out at a height of 17 m instead of 20 m.

Avec le profil type ci-dessous, le volume de matériaux à mettre en œuvre est 289 m³/ml de terre tout-venant et 212,5 m³/ml de remblai dur.



En tenant compte du même prix unitaire de terre que pour la solution classique (ce qui est défavorable car on n'aura pas les mêmes filtres et drains), et d'un prix unitaire du remblai dur de 45 USD/m³, le coût de l'ouvrage représente (évacuateur inclus) :

$$[289 \times (7 \text{ à } 9)] + [212,5 \times 45] = 11\,600 \text{ à } 12\,200 \text{ USD/ml de vallée}$$

Soit en moyenne 33 % de moins que la solution de référence.

c) La solution B1 permet en outre, pour un niveau du réservoir inchangé, d'augmenter considérablement la sécurité vis-à-vis des risques hydrologiques, pour un coût similaire ou même plus faible.

De plus, dans beaucoup de cas, on pourra adopter un tracé en plan arqué, ce qui devrait permettre de réduire le massif de remblai dur.

Enfin, compte tenu de la grande longueur possible de déversement, on peut, en conservant la cote des plus hautes eaux, augmenter la cote de retenue normale et donc le volume d'eau stocké derrière le barrage tout en réalisant une économie.

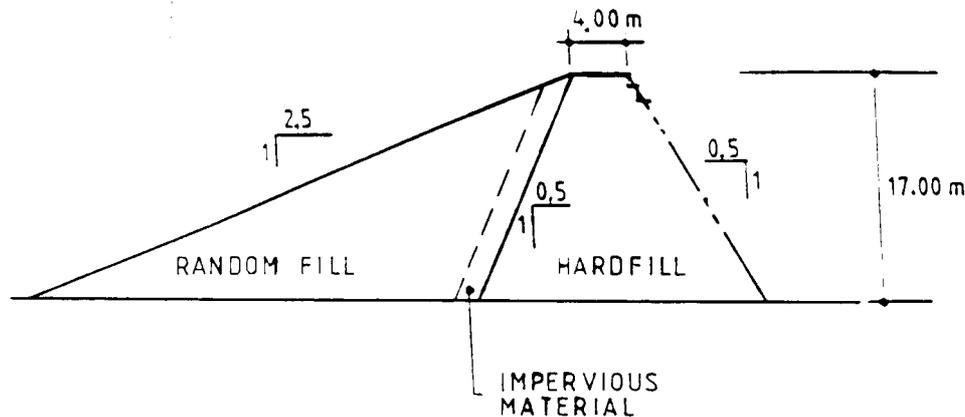
En effet, en passant à 18,50 m au lieu de 17 m la hauteur du profil, le prix au mètre linéaire devient :

$$[342,25 \times (7 \text{ à } 9)] + [245,125 \times 45] = 13\,500 \text{ à } 14\,000 \text{ USD/ml de vallée.}$$

Soit, en moyenne, une économie de 23 % sur le corps du barrage, pour une augmentation de 1,50 m de la cote de retenue normale (représentant une majoration de 20 à 30 % de la capacité du réservoir).

d) En cas de fondations meubles, des solutions du type terre armée ou en gabions en tôles pourraient conduire à des économies similaires.

With the profile shown in the following sketch, the materials requirement is 289 m³/linear metre earth and random fill and 212.5 m³/m hardfill.



Even allowing for the same earthfill unit cost as in the conventional design (a conservative assumption since the filters and drains would not be the same) and with hardfill at \$ 45/m³, the cost including spillway would be:

$[289 \times (7 \text{ to } 9)] + [212.5 \times 45] = \$ 11\,600 \text{ to } 12\,200/\text{metre valley width}$
 which is an average 33 per cent less than the conventional design.

c) Thus, with the same reservoir level, alternative B1 substantially improves safety against hydrological contingency, at similar and even lower cost.

Furthermore, in many cases, the dam could be arched, which would reduce the amount of hardfill required.

Lastly, by reason of the length of the overspill section, normal reservoir level could be set higher (with maximum flood level remaining the same), offering a larger storage capacity while still saving on project cost.

If the dam height were raised to 18.50 m instead of 17 m, the unit cost per linear metre becomes:

$[342.25 \times (7 \text{ to } 9)] + [245.125 \times 45] = \$ 13\,500 \text{ to } \$ 14\,000/\text{metre valley width}$
 an average saving of 23 per cent on the dam body for an extra 1.50 m on normal storage level (representing a 20 – 30 % increase in storage capacity).

d) For soft soil foundations, reinforced earth overspill types or sheet-metal gabions may give similar savings.

4. CAS DES PAYS OÙ LE COÛT DE LA MAIN-D'ŒUVRE EST BON MARCHÉ

4.1. Ouvrages de 30 à 100 m de hauteur maximale

Une comparaison a été faite pour un barrage de 50 m de hauteur moyenne, entre :

- la solution de référence barrage-poids en maçonnerie qui nécessite, avec une largeur en crête de 4 m et un talus aval incliné à 0,75/1, un volume moyen de maçonnerie de 1 140 m³ par m de vallée, et

- la solution alternative B2 à noyau en maçonnerie lesté par des recharges en terre. En admettant, pour le noyau, des talus inclinés à 0,25/1, les volumes de matériaux à mettre en œuvre par ml de vallée sont :

— maçonnerie	700 m ³ par ml
— terre	6 000 m ³ par ml

Si n est le ratio entre le prix unitaire de la maçonnerie et le prix unitaire du remblai en terre, le rapport entre le coût du corps du barrage dans la solution B2 (p_2) et celui du corps du barrage dans la solution de référence (p_1) s'écrit :

$$p_2/p_1 = (6\,000 + 700n) / 1\,140n$$

Si l'on tient compte pour le remblai de lest d'un prix unitaire de 3 USD/m³, et pour la maçonnerie d'un prix de 60 USD/m³, on a :

$$n = 20$$

$$p_2/p_1 = 0,88$$

Comme (i) la présence du remblai de lest facilite l'accès pour la réalisation de la maçonnerie, (ii) la quantité et donc le coût des terrassements sous le barrage diminuent, et (iii) le délai de construction est plus court, la solution B2 peut permettre une économie totale de l'ordre de 15 à 30 %.

4.2. Ouvrages de moins de 30 m de hauteur maximale

Des solutions du type B1 où l'on remplacerait le remblai dur par de la maçonnerie peuvent être intéressantes, mais des solutions type C avec des contreforts en maçonnerie présentent également des avantages, car les quantités totales de ciment et d'acier sont faibles, et les installations de chantier sont réduites par rapport à la plupart des autres solutions.

Une étude spécifique serait nécessaire dans chaque cas.

4. COUNTRIES WITH LOW LABOUR COSTS

4.1. Dams 30-100 m maximum height

A comparison has been made for a dam of 50 m mean height, between

- a conventional masonry gravity dam, with a crest width of 4 m and a downstream face batter of 0.75/1, requiring a mean masonry volume of 1 140 m³ per metre valley width, and

- alternative B2 (masonry core weighted with earthfill). Assuming the core is battered at 0.25/1 on both sides, the volume of material required per metre valley width would be:

— masonry	700 m ³ /m
— earthfill	6 000 m ³ /m

If n designates the ratio between the unit cost of masonry and the unit cost of earthfill, the ratio between the cost of the dam body in alternative B2 (p_2) and the cost of the conventional dam body (p_1) is:

$$p_2/p_1 = (6\,000 + 700n)/1140n$$

Taking a unit cost of \$ 3/m³ for the weighting fill and \$ 60/m³ for the masonry, we have:

$$n = 20$$

$$p_2/p_1 = 0.88$$

Since (i) the presence of the weighting fill provides convenient access for building the masonry, (ii) the quantity and therefore the cost of the foundation excavations is reduced, and (iii) construction time is shortened, alternative B2 might offer a total saving of the order of 15 to 30 per cent.

4.2. Dams less than 30 m maximum height

Solutions type B1 using masonry instead of hardfill can be attractive, but solutions type C with masonry buttresses also have advantages, since the total quantities of cement and steel are low and constructional plant for the works is reduced in comparison with most other solutions.

A specific study might be done in each case.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : mars 1992
N° 15916
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>