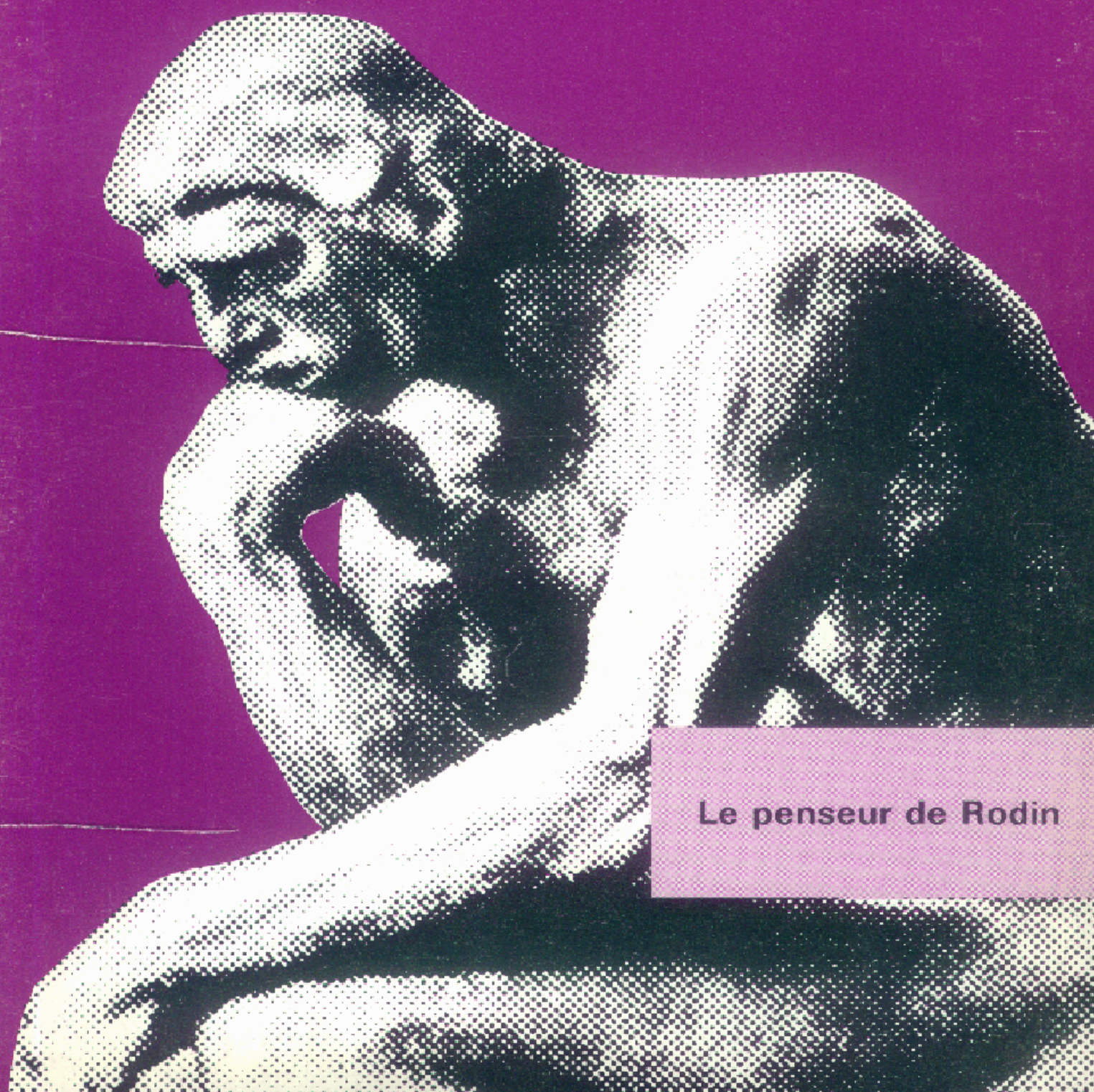


DAM DESIGN CRITERIA
THE PHILOSOPHY OF THEIR SELECTION

CRITÈRES DE PROJET DES BARRAGES
LA PHILOSOPHIE DU CHOIX



BULLETIN 61
1988



Le penseur de Rodin

La frappe finale des textes anglais et français, pour être reproductible par offset,
a été réalisée par le bureau Rousseau, Sauvé, Warren Inc., Montréal (Canada).

*The English and French texts were typed camera-ready
by Rousseau, Sauvé, Warren Inc., Montreal (Canada)*

DAM DESIGN CRITERIA
THE PHILOSOPHY OF THEIR SELECTION
CRITÈRES DE PROJET DES BARRAGES
LA PHILOSOPHIE DU CHOIX



BULLETIN 61
1988

Commission Internationale des Grands Barrages
151, bd Haussmann, 75008 Paris - Tél. : 47 64 67 33 - Télex : 641320 F (ICOLD)

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

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

TABLE DES MATIÈRES

HISTORIQUE : POURQUOI CE BULLETIN?	4
AVANT-PROPOS : POUR QUI CE BULLETIN?	6
1. INTRODUCTION	8
1.1. Remarques préliminaires	8
1.2. Critères et règles actuels (y compris les résultats de l'enquête internationale)	12
1.3. La fondation et son influence sur le projet	16
2. LA PHILOSOPHIE DES CRITÈRES DE PROJET	22
2.1. Buts	22
2.2. Scénarios de projet et méthode des coefficients partiels (coefficients d'incertitude)	24
2.3. « Coefficients d'incertitude » et « coefficients de sécurité »	28
3. SCÉNARIOS D'UTILISATION (CONDITIONS NORMALES)	32
4. SCÉNARIOS DE RISQUE (CONDITIONS EXCEPTIONNELLES)	36
5. QUELQUES RECOMMANDATIONS SPÉCIALES	40
5.1. Résultats des calculs	40
5.2. Coefficients d'incertitude (coefficients partiels). Quelques recommandations	42
6. MÉTHODES DE CALCUL. INFLUENCE DES CRITÈRES RETENUS	58
6.1. Généralités	58
6.2. Barrages en béton	58
6.3. Barrages en remblai	62
6.4. Méthode de calcul et précision des résultats	64
7. CRITÈRES AUTRES QUE CEUX RELATIFS AU CALCUL DE STABILITÉ ..	66
7.1. Surfaces de contact	66
7.2. Détails de projet	66
7.3. Méthodes de construction	68
7.4. Critères concernant l'exploitation	68
8. APPAREILS DE MESURE ET AUSCULTATION EN TANT QUE CRITÈRES DE PROJET	70
9. LEÇONS TIRÉES DE L'EXPÉRIENCE - ÉVOLUTION DES CRITÈRES ET DES MÉTHODES DE PROJET	74
10. CRITÈRES TENANT COMPTE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES	78
11. CONCLUSIONS	82

TABLE OF CONTENTS

HISTORICAL BACKGROUND : WHY THIS BULLETIN?	5
FOREWORD : FOR WHOM THIS BULLETIN?	7
1. INTRODUCTION	9
1.1. Preliminary remarks	9
1.2. Current criteria and codes of practice (including results of international survey)	13
1.3. Foundations and their significance in design	15
2. THE PHILOSOPHY OF DESIGN CRITERIA	23
2.1. Objectives	23
2.2. Design scenarios and method of partial coefficients (uncertainty factors)	25
2.3. “ Uncertainty factors ” versus “ safety factors ”	29
3. UTILISATION SCENARIOS (NORMAL CONDITIONS)	33
4. HAZARD SCENARIOS (EXTREME CONDITIONS)	37
5. SOME SPECIAL RECOMMENDATIONS	41
5.1. Results of analyses	41
5.2. Uncertainty factors (partial coefficients). Some recommendations	43
6. METHODS OF ANALYSIS IN RELATION TO ACCEPTANCE CRITERIA	59
6.1. General	59
6.2. Concrete dams	59
6.3. Embankment dams	63
6.4. Method of analysis and precision of results	65
7. CRITERIA OTHER THAN THOSE RELATED TO STRUCTURAL ANALYSIS	67
7.1. Interfaces	67
7.2. Design details	67
7.3. Construction methods and procedures	69
7.4. Designers operating criteria	69
8. INSTRUMENTATION AND MONITORING AS ELEMENTS OF DESIGN CRITERIA	71
9. FEEDBACK FROM EXPERIENCE - THE EVOLUTION OF CRITERIA AND DESIGN METHODS	75
10. CRITERIA IN RELATION TO THE STATE OF KNOWLEDGE	79
11. CONCLUDING REMARKS	83

HISTORIQUE

POURQUOI CE BULLETIN?

Quand le Comité des Calculs et de la Conception des Barrages fut installé en 1974, son principal objectif était de familiariser les concepteurs avec les outils puissants de calcul par ordinateur rendus disponibles par la méthode des éléments finis et par le développement rapide des matériels d'informatique. Cependant, il devint tout de suite évident que les calculs nouveaux et sophistiqués donnaient des résultats qui ne pouvaient pas être jugés par les critères et les règles de projet de la période précédente; pour cette raison, l'établissement d'un nouveau jeu de critères à partir duquel un comportement satisfaisant pouvait être apprécié, fut inclus dans les missions du Comité.

Cet objectif se révéla beaucoup plus difficile qu'on ne pouvait l'imaginer initialement et le présent Rapport, qui constitue la conclusion des travaux du Comité pour la période 1974-1986, s'il est le dernier Rapport du Comité ne constitue, en aucun cas, le point final sur un sujet qui donnera sans aucun doute encore du travail à nos successeurs.

L'approche initiale a été faite sous forme d'une enquête auprès des pays membres de la CIGB et d'un rapport sur les pratiques actuelles de choix et de définition des critères. Cependant, cette enquête, si intéressante fût-elle, ne donnait que peu d'indications pour l'avenir et le travail du Comité se concentra sur la philosophie qui devrait inspirer le choix des critères plutôt que sur des détails qui feront encore l'objet de nombreuses discussions dans l'avenir. Le but de ce Rapport, résultat de nombreux débats et controverses, était de présenter nos conclusions.

Des tentatives pour inclure des analyses quantitatives (semi-probabilistes et probabilistes) de la fiabilité furent faites mais les données disponibles ne paraissaient pas susceptibles de garantir une telle analyse. On s'est donc orienté vers une position moyenne et nous sommes heureux d'indiquer que ce Rapport final représente un consensus auquel tous les membres du Comité et tous les Comités Nationaux ont adhéré. Nous espérons que ce mémoire constituera un guide utile pour la suite du travail.

REMERCIEMENTS

En tant que Président du Comité, je voudrais en remercier tous les membres et particulièrement ceux qui ont participé aux débats avec une mention spéciale pour le Dr Allen D. McConnel dont la diplomatie et le travail ont permis à la version finale de franchir le cap des ultimes réunions.

O. C. Zienkiewicz

HISTORICAL BACKGROUND

WHY THIS BULLETIN?

When the Committee on Analysis and Design of Dams was first inaugurated in 1974 its main intent was to introduce the designer to the powerful computation tools of analysis made available by the Finite Element Method and the rapid growth of computer hardware. However it was immediately evident that the new, sophisticated, analysis yielded results which could not be judged by the criteria and design codes of the more primitive age and for that reason the drafting of a new set of criteria by which satisfactory performance could be assessed was included in the terms of reference of the Committee.

This objective proved much more difficult than initially envisaged and the present report marking the conclusion of the 1974-1986 committee life was its last one — though by no means a final word on the subject which doubtless will provide work for its successors.

The initial approach was to conduct a survey of member countries of ICOLD and to ascertain the currently available practice. However, though interesting this gave little guidance to the future and the work of the Committee focussed on the philosophy which should govern the selection of the criteria rather than on detail which will have to be subject to many future discussions. This report attempts to present our findings and is the result of much debate and controversy.

Attempts of including quantitative stochastic and probabilistic reliability approaches were made but the available data did not seem to warrant such an approach. A middle course was thus steered and we are glad to report that the final report represents a consensus to which all Committee members and National Committees agreed. We hope it is of guidance to future work.

ACKNOWLEDGEMENTS

As Chairman of the Committee I would like to thank all members and others who participated in the debate — particularly thanks are due to Dr. Allen D. McConnell who with his diplomacy and work steered the final draft through the various meetings.

O. C. Zienkiewicz

AVANT-PROPOS

A QUI CE BULLETIN?

Le choix des critères de projets est peut-être l'un des éléments les plus importants du processus de conception et de construction d'un barrage car il peut influencer l'étendue et la nature des reconnaissances et les études et calculs; de plus, il est essentiel à la préparation des dessins, des spécifications et des manuels d'exploitation et de maintenance.

L'étude des critères de projets pour barrages a fait partie, dès le début, des missions du Comité des Calculs et de la Conception des Barrages; elle constitue le dernier rapport établi par ce Comité.

L'approche initiale a été faite sous forme d'une enquête auprès des pays membres de la CIGB et d'un rapport sur les pratiques actuelles de choix et de définition des critères.

Finalement, le Comité est arrivé à la conclusion qu'il serait plus conforme aux intérêts de la CIGB de traiter de façon philosophique le choix des critères de projets de barrages, en utilisant le terme de "projet" dans son sens le plus large. Le rapport s'efforce donc de mettre à la disposition des ingénieurs praticiens, des recommandations qui les aideront à identifier toute la série de problèmes qui sont à considérer dans le choix des critères de projets pour un barrage particulier.

Nous espérons que ce document incitera les ingénieurs de projets à réfléchir sérieusement à la signification des critères qu'ils adoptent et les rendra conscients des conséquences que ces critères peuvent avoir sur la conception de la construction.

Prof. O. C. Zienkiewicz

FOREWORD

FOR WHOM THIS BULLETIN?

The selection of design criteria is perhaps the most important activity in the process of design and construction of a dam. The choice of design criteria may influence the scope and nature of explorations, studies and analyses and is basic to the preparation of drawings, specifications and operation and maintenance manuals.

The study of design criteria for dams was included in the original terms of reference of the Committee on Design and Analysis of Dams and is the final report to be issued by that Committee.

The initial approach to the subject was to conduct a survey of member nations of ICOLD and to prepare a report on current practice with respect to the selection and definition.

Finally, the Committee arrived at the conclusion that the interest of ICOLD would best be served by dealing in philosophical way with the selection of dam design criteria using the term "design" in the broadest possible sense. The report therefore attempts to provide the practising engineer with guidelines which will assist him or her in identifying the complete range of problems which must be addressed in the choice of criteria for the design of a particular dam.

We trust that the report will stimulate design engineers to think seriously of the significance of the design criteria which they adopt and apply and to be aware of the influence which the criteria should have in the preparation of drawings and specifications which define the construction.

Prof. O. C. Zienkiewicz

1. INTRODUCTION

1.1 REMARQUES PRELIMINAIRES

Traditionnellement, le terme "critères de projet" appliqué aux barrages est implicitement limité aux hypothèses utilisées dans les calculs destinés à vérifier la stabilité du barrage proprement dit et, au moins, de son contact avec le terrain de fondation, sous l'action d'un ensemble donné de cas de charges.

Les critères publiés comprennent également ceux concernant:

- a) les charges et les actions liées à l'environnement (comprenant les crues) auxquelles le barrage et sa fondation seront probablement soumis,
- b) les caractéristiques physiques des matériaux de construction et de fondation,
- c) certains autres critères qui ne concernent pas la stabilité du barrage proprement dit.

Le présent rapport n'entre pas dans les détails des considérations hydrologiques et hydrauliques qui ont été traitées par le Comité de l'Hydraulique.

Les critères mentionnés en (c) ont généralement évolué de façon empirique, à partir des expériences et des observations. Elles concernent notamment les caractéristiques chimiques de certains matériaux et l'influence de celles-ci sur le comportement dans le temps des ouvrages.

Les critères ont évolué au cours des années par suite des expériences enregistrées et des progrès technologiques permettant l'utilisation de méthodes de calcul perfectionnées et complexes. Par exemple, il y a peu de temps encore, la méthode la plus moderne de calcul des barrages-voûtes (Trial Load) nécessitait, pour un seul calcul, l'emploi de machines à calculer très onéreuses et un travail important de la part des ingénieurs. De même, le calcul très simplifié et approché d'un barrage en remblai (stabilité vis-à-vis de la rupture sur une surface de glissement potentiel) exigeait un assez gros investissement en temps et en effort de la part de l'ingénieur.

1. INTRODUCTION

1.1 PRELIMINARY REMARKS

Historically, the term "design criteria" when applied to dams has had the connotation of being limited to the criteria used in structural analyses to assure the structural stability of the dam itself and at least its interface with the foundation under a selected set of loading conditions.

Published criteria traditionally cover:

- a) the loadings and environmental influences (including floods) to which the dam and its foundation will or will likely be subjected,
- b) the physical characteristics of the construction and foundation materials,
- c) other "non structural" criteria.

This report refrains from detailed discussion of hydrologic and hydraulic considerations as these have been dealt with exhaustively by the "Committee on Hydraulics".

The "non structural" criteria have usually evolved empirically from long-term experience and observations and include such things as chemical properties of some materials and their influence on long-term behaviour.

The criteria have evolved with time as a result of the growth of historical records and the development of technologies which have allowed the introduction of refined and complex methods of analysis. For example, it is not so long ago that the most sophisticated method of structural analysis then available for arch dams (the trial load method) required expensive calculating machines and a tremendous amount of physical effort to complete a single analysis. Even a very simple form of approximate analysis of an embankment dam (for stability against failure on one potential failure surface) involved quite a lot of time and effort on the part of the designer.

Aujourd'hui, grâce à la puissance des ordinateurs et aux méthodes de calcul numérique (éléments finis, etc.), on sait faire des calculs plus précis, à moindre coût, tout en s'affranchissant d'un bon nombre des hypothèses autrefois nécessaires. Si un calcul non linéaire complet reste toujours relativement plus onéreux, la possibilité qui nous est offerte de prévoir les déplacements et le comportement des ouvrages pour un choix arbitraire des caractéristiques des matériaux et des conditions de charge conduit à adopter une philosophie nouvelle dans le domaine de la justification du projet et de la formulation de critères de projet plus rationnels qu'avant.

Les données fournies par l'auscultation sur le comportement réel des ouvrages nous aident à élaborer de tels critères plus significatifs. De plus, les accidents et les ruptures (ruptures totales ou ruptures partielles) sont autant d'expériences essentielles pour l'amélioration des critères conduisant à des projets sûrs et économiques.

Par ailleurs, on assiste actuellement au développement de critères relatifs à la stabilité des barrages soumis à des séismes, par suite du nombre grandissant de cas où le comportement d'ouvrages soumis à des secousses importantes a pu être observé.

Il existe actuellement une dichotomie entre les critères relatifs au projet et au calcul des barrages en béton, et ceux relatifs aux barrages en remblai. Dans le cas des barrages en béton, pour lesquels on est maître des caractéristiques du matériau, les "coefficients de sécurité" sont souvent définis avec confiance (mais en tenant compte toutefois des jugements basés sur l'expérience) en fonction de la résistance connue du matériau. Ainsi, on peut retenir des critères donnant une marge, plus ou moins bien définie, par rapport aux niveaux de contraintes correspondant à la "rupture". Par contre, pour le calcul des barrages en remblai, les critères habituellement adoptés sont surtout empiriques, sans aucune rigueur théorique apparente en ce qui concerne les limites retenues pour les coefficients de sécurité relatifs aux contraintes. En effet, on peut s'étonner que l'on prenne un coefficient de sécurité, vis-à-vis de la rupture des barrages en béton, qui peut atteindre une valeur de 4 tandis que, pour une digue en remblai, on accepte parfois des coefficients de 1,1 seulement. Les digues en remblai sont-elles moins sûres, ou s'agit-il de deux définitions différentes? Cette question sera reprise plus loin au sujet de la philosophie du choix des critères de projet qui, nous l'espérons, pourra influencer la méthodologie future des études de projet.

On constate que l'expérience a conduit, et conduit toujours, aux évolutions suivantes dans le domaine des critères de projet des barrages:

- a) les critères concernant les projets des ouvrages proprement dits continuent d'évoluer et de se préciser,
- b) pour résoudre certains problèmes connus ou susceptibles de se présenter, des solutions adaptées sont mises au point (matériaux spéciaux, dispositions constructives) mais celles-ci peuvent échapper aux critères utilisés dans le projet et le calcul,

Today the power of the computer coupled with numerical procedures of the finite element or other discrete approaches allow not only more accurate analyses to be performed at relatively small cost but eliminate many of the assumptions previously necessary. While full nonlinear analyses are still relatively more expensive, the ability to predict displacements and general behaviour for arbitrary material properties and load conditions requires the introduction of a new philosophy to the whole subject of design acceptability and the formulation of more rational design criteria than hitherto used.

The input from instrumentation measurements on behaviour of prototype structures is aiding the development of meaningful design criteria. Further, incidents and failures or near failures which have occurred over the years provide important experiences for improving the criteria for the design of safe economical structures.

We can also observe an ongoing evolution in the design criteria for seismic stability of dams as more and more experience becomes available from the observed behaviour of those which have been subjected to severe shaking.

A dichotomy currently exists between criteria which govern the structural design and analysis of concrete and embankment dams. In the case of concrete dams, in which the physical properties of the material can be highly controlled, the "factors of safety" are often defined with confidence (tempered by empiricism) in terms of the controlled strength of the material. Hence, it is possible to use criteria which offer a more or less defined margin with respect to stress levels which can be defined as "failure". By comparison, the conventional criteria for structural analysis of embankment dams are essentially empirical without any apparent theoretical rationale for the limits set for safety coefficients relating to stresses. It is indeed surprising to many that for a concrete arch dam many designers use "safety factors" as high as 4 or more against collapse while for an embankment, factors as low as 1.1 are on occasion accepted. Does it mean that the latter are relatively unsafe or is it a matter of different definitions? We shall address this matter when discussing the philosophy of design criteria specification which we hope can influence the future design methodology.

It may be said that experience has led to and is continuing to lead to the following developments relative to dam design criteria:

- a) structural design criteria continue to be developed and refined,
- b) special materials and design details continue to evolve to deal with potential or known problems but these may not enter into criteria for structural design and analysis,

- c) les spécifications techniques relatives aux matériaux de construction (production, traitement) et les méthodes de construction continuent de s'améliorer en vue d'éliminer certains problèmes nuisibles à la sécurité,
- d) des spécifications techniques et des critères pour l'étude des contacts (forme, traitement) des barrages en remblai avec leurs fondations (ouvrages rigides en béton ou rocher) sont mis au point pour éliminer les phénomènes nuisibles (déformations, contraintes localisées, etc.) qui peuvent compromettre la sécurité mais qui ne sont pas parfois pris en compte dans les calculs traditionnels de stabilité,
- e) les méthodes et techniques de traitement de la fondation (notamment pour l'étanchement), dont les critères sont inévitablement peu précis et visent les résultats à obtenir ou les problèmes à éviter, sont mises au point.

Au fur et à mesure de l'accroissement des hauteurs des barrages et des charges d'eau, il faut remettre en question l'application de certains critères utilisés avec succès pour des barrages plus petits.

Le problème des critères de projet est évidemment complexe. On ne peut pas le résoudre en avançant un nombre limité de valeurs ou de coefficients à introduire dans certains calculs pour obtenir des indices de sécurité ou de stabilité compris dans une enveloppe imposée.

Au cours de la préparation du présent rapport, on a diffusé un questionnaire auprès des différents pays. Celui-ci concerne un nombre important de critères significatifs, dont la plupart sont chiffrables.

Compte tenu de l'évolution constante des différents critères, le Comité ne doit pas chercher à présenter une liste définitive de critères à appliquer sans réflexion. Cependant, la mission du Comité est d'examiner les notions et les philosophies qui doivent être prises en compte par les ingénieurs d'études dans la définition précise des critères à retenir pour chaque barrage et son site, qui sont tous différents.

Tel est le contexte de l'élaboration du présent rapport. Dans la présentation des critères, on distingue ceux qu'il convient de quantifier de ceux qui sont mieux consignés dans les plans et dans les spécifications techniques, ainsi que dans les documents rédigés par le bureau d'études à l'intention du personnel de chantier, afin de préciser les dispositions des documents contractuels.

1.2 CRITERES ET REGLES ACTUELS (Y COMPRIS LES RESULTATS DE L'ENQUETE INTERNATIONALE)

Conformément à sa mission, le Comité s'est efforcé d'obtenir une vue globale des critères actuellement utilisés pour l'étude des barrages dans les pays-membres de la CIGB. Le but était l'établissement du contexte général permettant une discussion sur la philosophie du choix et de l'application des critères.

- c) specifications continue to develop for the production and treatment of construction materials or methods of construction which will eliminate problems which are known to adversely effect security,
- d) specifications and criteria are also evolving for the design of the form and treatment of interfaces between embankment dams and their foundations (rigid concrete structures or rock foundations) to avoid unfavourable strains or local stresses or other conditions which might adversely affect safety but which may not be dealt with in conventional stability analyses,
- e) the development of methods and techniques for foundation treatment (seepage control in particular) which involve criteria that can only be expressed in general terms of the desired result or the problems to be avoided.

As dams become higher with corresponding increases in hydraulic heads, the application of some criteria, which have proven successful for smaller dams, should be questioned.

It is obvious that the question of design criteria is complex. It cannot be answered with the simple statement of a limited number of figures or ratios to be applied to certain calculations to produce indices of security or stability which fall within prescribed limits.

In the course of preparing for the production of this report, a questionnaire was distributed internationally. This questionnaire dealt with a significant number of important criteria which fall mainly within the scope of the quantifiable elements.

In view of the fact that criteria of all sorts are constantly evolving, it would be wrong for this Committee to present definitive criteria to be followed religiously by designers. On the other hand, it is appropriate for the Committee to address itself to concepts and philosophies which must be taken into consideration by designers in the precise definition of criteria which should be applied in the case of each dam and its unique site.

It is with this background that the report has been prepared. The discussion of criteria has been subdivided in such a way as to distinguish between those which are best dealt with quantitatively and those which are best covered by appropriate details in drawings and specifications and in reports prepared by designers for the explicit use of construction personnel to amplify the contract documents.

1.2 CURRENT CRITERIA AND CODES OF PRACTICE - (INCLUDING RESULTS OF INTERNATIONAL SURVEYS)

As part of its mandate, the Committee attempted to obtain a synthesis of criteria in current use throughout the member countries of ICOLD for the design of dams. The purpose of this was to establish a background against which the discussion of the philosophy of choice and application of criteria might be presented.

On a pu faire le point des critères actuellement utilisés, à l'aide d'un questionnaire dont les résultats complets figurent dans une publication séparée que l'on peut obtenir au Bureau Central de la CIGB. Il est à noter qu'un questionnaire général est un moyen peu satisfaisant d'identifier les divergences exactes entre les différentes méthodologies et philosophies adoptées pour l'étude des barrages. Il ne saurait faire ressortir la part de jugement qui intervient inévitablement dans l'interprétation et l'application de critères qui revêtent un caractère d'application plus ou moins automatique.

On a remarqué, dans les réponses au questionnaire que, malgré l'homogénéité globale des approches dans la définition des critères de base, il existait néanmoins certains domaines comportant des divergences non négligeables pour certains détails importants.

Bien que la CIGB soit un excellent forum de communication pour les échanges d'idées entre les ingénieurs, il est compréhensible que l'évolution des critères adoptés par tel ou tel ingénieur est fortement influencée par son expérience personnelle et par les conditions locales (géologiques, climatiques, économiques) des zones dans lesquelles cette expérience a été acquise.

Certains ingénieurs (mais non tous) ont l'avantage d'être associés de près à un ou plusieurs projets, depuis le début des études et des reconnaissances jusqu'à la construction et même la mise en service. Mais, malheureusement, dans beaucoup de cas, l'intervention de l'ingénieur s'arrête avec la remise des plans et des spécifications techniques et, ensuite, les informations "en retour" sont rares.

Le Comité reconnaît que, pour les raisons ci-dessus, il est inévitable que des divergences continuent d'exister. Il importe que les critères évoluent à la lumière des expériences acquises, que les critères ayant un caractère fondamental dans chaque cas particulier ne soient pas négligés ou minimisés, et que les divergences soient réduites ou éliminées dans le cas des critères qui, selon l'expérience internationale, sont essentiels pour assurer le comportement sûr et fiable des barrages, quel que soit leur type.

Partout dans le monde, il existe des documents de référence, publiés par des organismes techniques, par l'administration, etc. pour guider les ingénieurs travaillant dans le domaine des barrages. Le but commun de ces documents est de préciser les éléments dont il faut tenir compte pour assurer des ouvrages sûrs et fiables et, dans certains cas, d'imposer certains critères à respecter dans les différentes étapes d'étude et de calcul des barrages.

Souvent, ces règles reflètent les expériences et les habitudes des ingénieurs à l'époque de leur rédaction. Aussi, des mises à jour régulières sont-elles nécessaires pour que ces règles traduisent les pratiques modernes en ce qui concerne les différents types de barrage ainsi que les critères qui sont essentiels à l'obtention de leur sécurité.

The survey of criteria in current use was made by the issue of a questionnaire and the complete results of the survey are contained in a separate publication which is available on request from the Central Office of ICOLD. It should be appreciated that a general questionnaire is an inadequate means of identifying precise differences in the approach and philosophy related to the design of dams. In no way can it express the element of judgement which must inevitably be called upon in the interpretation and application of criteria which fit a more or less mechanical frame of reference.

It was noted in replies to the questionnaire that, although there is a general uniformity of approach to the definition of basic criteria, there are some areas in which there are not insignificant differences in important details.

It is understandable that, despite the excellent forum for communication offered by ICOLD for the exchange of ideas between dam engineers, the evolution of criteria adopted by a particular designer is very much influenced by the personal experience of the designer and the geology, climate and economic conditions prevailing in the areas in which such experience has been developed.

Some but not all designers have the advantage of intimate association with one or more projects from the beginning of studies and explorations through the design and construction stages and into the operating phase. Unfortunately, in many cases the designer's association with a dam project terminates with the issue of drawings and specifications and little, if any, "feedback" occurs subsequent to that point in time.

The Committee acknowledges the fact that, for the reasons mentioned above, differences must and will continue to exist. It is important that criteria evolve to reflect experience; that the criteria which are critical in each particular case are not overlooked or treated lightly; that divergences of opinion are reduced or eliminated with respect to those design criteria which international experience proves to be indispensable in the assurance of the safe and reliable performance of dams of all types.

There exist throughout the World many reference documents which have been prepared by technical institutions, government agencies, etc. for the guidance of engineers who are engaged in the study and design of dams. The general purpose of such documents is to identify items or aspects which must be taken into account to ensure safe and reliable structures and, in some cases, to specify particular criteria which must be respected by the designer in the various studies and analyses which form part of the design.

In most cases, these design codes reflect the experience and the practice of dam engineers at the time of their preparation. Such codes should be updated regularly to reflect the state of the art both in relation to dam types and to criteria which are critical to their security.

Le Comité considère que ces normes ou règles sont très précieuses pour la profession, notamment pour les ingénieurs n'ayant pas une grande expérience de la relation qui existe entre le projet et le comportement de l'ouvrage en service. Il est certain que les critères définis dans ces documents sont nécessaires et valables pour l'établissement de projets corrects, du moins dans les conditions prévalant dans le pays concerné.

Cependant, ces règles risquent d'être appliquées sans jugement par des ingénieurs inexpérimentés. Une telle application aveugle peut conduire à ignorer la présence de conditions particulières à un site donné (conditions physiques ou d'exploitation), qui méritent une interprétation spéciale, voire même la modification de certains critères définis dans les règles.

Aussi, le Comité préconise-t-il que ces codes soient utilisés par les ingénieurs en tant que recommandations et non comme un ensemble de règles rigides à suivre aveuglément, sans réfléchir aux modifications qui peuvent être justifiées dans certains cas.

1.3 LA FONDATION ET SON INFLUENCE SUR LE PROJET

Toutes les charges appliquées à un barrage, y compris le poids propre de celui-ci, sont transmises à la fondation. Le mécanisme de ce transfert, de même que la répartition des efforts, varient selon la forme et la raideur du barrage ainsi que selon la raideur, la résistance mécanique et la déformabilité des matériaux de fondation. Celles-ci peuvent être influencées par la présence d'écoulements souterrains provenant de la retenue, ou par l'introduction de phénomènes dynamiques liés aux séismes. C'est une vérité de dire qu'un barrage ne peut être plus résistant que sa fondation. Pour cette raison, l'utilisation de critères de projet et de méthodes de calcul très élaborés et très détaillés pour analyser le comportement du barrage proprement dit n'est justifiée que dans le cas où la fondation est introduite dans les calculs comme une partie intégrante de la structure ou comme une extension de l'ouvrage. Ainsi, il convient de reproduire la fondation avec le même niveau d'élaboration ou de détail que le barrage, et les critères adoptés doivent traduire les incertitudes dans la connaissance des conditions réelles.

Malheureusement, ces conditions de fondation sont rarement ou jamais connues avec le même degré de certitude ou de précision que celles du barrage proprement dit. En outre, le maître d'ouvrage est parfois soumis à des contraintes financières avant le début des travaux et, dans ce cas, il ne veut pas, ou ne peut pas, financer les reconnaissances approfondies, nécessaires à l'établissement d'un projet parfaitement défini. Si les crédits nécessaires sont disponibles, la nature même de la fondation peut s'opposer à la bonne définition de l'ensemble des paramètres qui influencent les critères de projet ou qui sont essentiels aux calculs de stabilité. On peut citer: les massifs rocheux hétérogènes et anisotropes avec un réseau complexe d'accidents (diaclasses, failles, surfaces de cisaillement); formations alluviales de grande profondeur avec nappe phréatique peu profonde (surtout si cette formation est stratifiée et hétérogène); formations karstiques; etc. Il peut s'avérer impossible de déceler les couches minces argileuses dans un rocher apparemment homogène à l'aide des techniques traditionnelles de forage, et même les observations tirées des galeries de reconnaissances ou des forages de grand diamètre sont ponc-

This Committee believes that such "standards" or "codes" are invaluable to the profession and in particular to engineers who may lack an extensive experience in the relationship between the design and performance of dams. There is no doubt that the criteria defined in such documents are necessary and valid for the correct design of dams at least for conditions prevailing within the country of their origin.

However, there exists the danger that such codes may be applied without discrimination by inexperienced engineers. Their uninformed application may result in the failure to recognise, for a particular dam site, the presence of special conditions, physical or operational, which merit a special interpretation or even modification of some criteria defined in the code.

This Committee therefore recommends that such codes be used by the engineering profession as guidelines for dam design rather than as rigid rules which should be followed without question and without consideration of variations which may be justified in particular cases.

1.3 FOUNDATIONS AND THEIR SIGNIFICANCE IN DESIGN

All loads on a dam, including its own dead load, are ultimately transmitted to the foundations. The manner in which the load is transferred and the distribution of the loading varies according to the form and stiffness of the dam and the stiffness, strength and deformation characteristics of the foundation materials. The latter may vary with the presence of seepage flows from the reservoir or with the introduction of dynamic conditions associated with earthquakes. It may truthfully be said that the dam structure can be no safer than its foundations. Hence, the use of highly sophisticated and detailed design criteria for and methods of analysis of the dam structure itself cannot be justified unless the foundations are included as an integral part of the structural system or as a continuation of the structure. As such, they should be treated with a comparable level of sophistication and detail or involve criteria, the conservatism of which is consistent with the knowledge of conditions.

Unfortunately, the true condition of the foundations can rarely, if ever, be known with the same degree of accuracy and precision as the dam structure itself. In addition, sometimes the owner suffers financial constraints before construction commences and is hesitant or unable to allocate sufficient funds to carry out foundation explorations to the extent required for a completely rational design. Even when funds are available for foundation explorations, the very nature of the foundations may impose severe limitations on the definition of all parameters which contribute to the design criteria or are essential to safety analyses. In this category are heterogeneous and anisotropic rock masses with complex joint, fault and shear structures, deep alluvial deposits with high water table, (particularly when stratified and heterogeneous) karstic deposits, etc. The identification of thin clay seams in otherwise sound rock may defy conventional drilling techniques, and even exploratory adits or large diameter bore holes indicate only conditions at the sites of the adits or holes. Saprolitic soils in which weathering is irregular and in which the adverse geological structures of the original rock mass remain as planes of weakness also present particular problems which are difficult to define by conventional exploration methods.

tuelles. Les sols résiduels à altération hétérogène et dans lesquels les accidents défavorables de la roche-mère subsistent sous forme de plans de faiblesse posent également des problèmes particuliers qui sont difficiles à cerner par les techniques de reconnaissances habituelles.

Il y a eu des cas où le nombre et la répartition géographique des digues le long de la retenue étaient tels que des programmes traditionnels de reconnaissances étaient pratiquement et économiquement irréalisables. Dans ces cas, le projet a comporté un ensemble de détails destinés à s'adapter aux conditions de fondation mises à jour par les reconnaissances pendant les travaux et par les fouilles.

Ainsi, on peut être confronté aux questions suivantes:

- Sur l'ensemble de l'emprise de la fondation, à quelle profondeur les caractéristiques sont-elles conformes aux hypothèses utilisées pour l'établissement du projet global?
- La structure et les caractéristiques du massif de fondation sont-elles suffisamment connues pour que le glissement du barrage avec une partie de la fondation soit impossible?
- Quelles pentes donner aux talus des fouilles temporaires et permanentes pour qu'ils soient stables?
- L'étanchéité de la fondation est-elle suffisante pour répondre aux exigences de l'ouvrage en service sans compromettre la stabilité du barrage ou de sa fondation? En cas d'étanchéité insuffisante, quel traitement (étanchement, drainage) faut-il appliquer pour réduire les fuites et/ou la pression hydrostatique interne à des valeurs acceptables?

Les informations obtenues lors des reconnaissances sont à compléter par une visite détaillée des fouilles et l'évaluation des conditions ainsi révélées.

Ainsi qu'il est dit plus haut, il est donc évident que les hypothèses adoptées pour la fondation dans l'étude de stabilité du complexe barrage-fondation doivent être plus prudentes que celles relatives au barrage lui-même, puisque, pour ce dernier, on peut agir sur la qualité et l'état des matériaux de construction.

Souvent, il est préférable de traiter les critères relatifs à l'étude de la fondation en sélectionnant un ensemble de paramètres; les calculs éventuels sont exécutés pour cet ensemble, en vue d'aboutir à une enveloppe de coefficients permettant à l'ingénieur d'évaluer la qualité de son projet.

Certains critères relatifs à l'étude des fondations ne sont pas actuellement justiciables du concept "coefficient de sécurité" et le projet doit fournir une solution positive au problème en jeu. Il s'agit notamment des problèmes suivants:

There have also been cases where the number and geographical distribution of dykes along the reservoir rim have been such that conventional exploration programmes have not been practical or economically feasible. In such cases the design involved a range of details to accommodate foundation conditions as revealed by explorations during construction and by actual construction activities.

Hence, the designer may be faced with such questions as:

- At what depth over the entire foundation area occurs the surface of foundation which matches the criteria upon which the overall design is based?
- Are the fabric and properties of the foundation mass well enough known to ensure that sliding of the dam with a portion of the foundation is not possible?
- What slopes may be considered stable for temporary and permanent excavation?
- Is the foundation sufficiently watertight to meet the service requirements of the structure without jeopardising the stability of the structure or its foundation? If not, what treatment in the form of sealing or drainage will procure sufficient watertightness and/or reduce hydrostatic pressure to acceptable values?

Data obtained from pre-construction explorations must be complemented by detailed inspection and assessment of conditions revealed during the foundation excavation works.

It is therefore evident, as mentioned above, that criteria applied to foundations for the structural analysis of the dam-foundation complex should be more conservative than those applied to the structure for which control can be exercised on the quality and condition of the construction materials.

Many of the criteria applied to foundation design may best be covered by the selection of a range of parameters and carrying out analyses (where applicable) for the range so that an envelope of factors is available for evaluation by the designer as to the adequacy of the design.

Other criteria related to the design of foundations are not today subject to the application of a conventional "factor of safety" and the design must provide a positive solution to the potential problem. In this category are:

- a) érosion interne du noyau central en terre, les particules entraînées s'échappant dans les vides de la recharge aval ou de la fondation sous-jacente,
- b) érosion de la fondation et entraînement des matériaux dans les vides des zones perméables de la recharge aval, derrière le noyau,
- c) érosion de l'écran d'étanchéité de la fondation (ou érosion de la fondation) et entraînement des matériaux dans les vides de la zone aval de la fondation,
- d) liquéfaction de la fondation lors d'un séisme,
- e) problèmes liés à la dissolution de certains matériaux dans la fondation.

Dans ces cas, il n'est pas question de prévoir des remèdes "partiels", dont la probabilité de protection est inférieure à 100 %. Le traitement prévu (enlèvement des matériaux suspects, réseau de drainage, étanchements, filtres, consolidation) doit s'inspirer d'une règle simple: le phénomène ne doit pas se produire.

Quelle que soit l'attention portée au choix des critères de projet et à l'étude de la fondation et du traitement de celle-ci, et quelle que soit l'étendue des reconnaissances et des études, l'expérience montre que les problèmes inattendus, rencontrés lors des travaux, sont presque toujours liés à la fondation de l'ouvrage.

- a) the question of internal erosion of embankment core material into voids in the downstream zone or the foundation upon which it is placed,
- b) the erosion of foundation material into the voids of permeable embankment zones downstream from the core,
- c) the erosion of foundation cut-off material (or of constituents of the foundation materials) into voids in the downstream foundation area,
- d) the liquefaction of foundation material under the influence of earthquake,
- e) problems associated with the solubility of some materials within the foundation mass.

In these cases, there should be no question of providing "partial" protection for which the probability of success is less than 100 %. The treatment, whether in the form of excavation, controlled drainage, sealing, filtering, or densification must be based on the simple criterion that the phenomenon cannot be allowed to occur.

Experience has shown that, irrespective of the care and attention given to the selection of criteria for and the design of foundations and foundation treatment and despite the extent of exploration and studies made for purposes of design, the majority of problems arising during construction relate to the structure foundations.

2. LA PHILOSOPHIE DES CRITÈRES DE PROJET

2.1 BUTS

Face à un projet de barrage, le souci de l'ingénieur est de créer un ensemble constitué du barrage, de sa fondation et de son environnement, qui, dans les conditions les plus économiques:

- a) se comportera de façon satisfaisante sans détérioration notable dans les **conditions normales** d'exploitation,
- b) évitera la rupture catastrophique dans les **conditions exceptionnelles** (c'est-à-dire, les conditions les plus improbables mais possibles).

Les "détériorations" jugées tolérables en (a) ci-dessus peuvent correspondre notamment aux déplacements permanents de faible amplitude, à une fissuration superficielle limitée du béton, à certaines modifications du régime des percolations, etc.

Dans les conditions visées en (b), on peut accepter des déformations et des fissurations importantes, et même des détériorations permanentes et importantes (déplacements, déformations, percolations, exigeant des réparations); mais **la sécurité ne doit pas être compromise**.

Ces deux objectifs peuvent être considérés comme les **critères de base** conduisant à un projet acceptable. Mais par sa nature même, ce problème soulève deux questions.

D'abord, les termes "**conditions normales**" et "**conditions exceptionnelles**" utilisés ci-dessus ne sont pas assez précis, bien que compris, de façon qualitative, dans la vie de tous les jours. Bien sûr, on peut essayer de les chiffrer à l'aide des notions de probabilité mathématique et des statistiques. Pour certains événements ou certaines conditions, on dispose d'une bonne quantité de données statistiques, mais, pour d'autres, il n'existe pas assez d'informations pour évaluer la probabilité de ces événements ou conditions, et il s'agit donc de porter un jugement avisé.

2. THE PHILOSOPHY OF DESIGN CRITERIA

2.1 OBJECTIVES

When considering any dam design the engineer attempts to create a structural form which together with the foundation and environment will, most economically:

- a) perform satisfactorily its function without appreciable deterioration during the conditions **expected normally** to occur in the life of the structure and,
- b) will not fail catastrophically during the **most unlikely but possible** conditions which may be imposed.

The "deterioration" which can be tolerated under (a) may include small (limited) permanent displacements, limited surface cracking of concrete, some changes in seepage quantities and patterns, etc.

The conditions prevailing under b) may be permitted to cause extensive distortion and cracking and even appreciable permanent movement, distortion, deformation and seepages requiring repair but **must ensure safety**.

These two objectives can be considered as the **basic criteria** which if achieved ensure satisfactory design. However, the very nature of the problem specified poses two questions.

The first is that the very words "**expected normally**" and "**most unlikely but possible**" (credible) are not precise though doubtless understood qualitatively by many in everyday life. Attempts to quantify them can, of course, be made by the use of the mathematical probability theory and statistics. For some events or conditions reasonable statistical data are available, however for many others sufficient data to assess probability of occurrence just do not exist and an intelligent assessment of evidence has to be made.

La deuxième question soulevée concerne nos capacités techniques; on suppose que, étant donné un ensemble de conditions définies avec sûreté, les méthodes de calcul dont on dispose permettront une évaluation précise du comportement total du barrage et de sa fondation. Dans ce domaine, l'incertitude est moindre, et l'on peut supposer que les outils modernes de calcul (ainsi que les modèles réduits) sont capables de résoudre de façon acceptable la plupart des problèmes rencontrés. Ceci peut paraître trop optimiste, mais il faut dire que nous savons faire des calculs de plus en plus perfectionnés (et onéreux) pour reproduire des phénomènes complexes. C'est à l'ingénieur responsable du projet de décider du niveau d'élaboration nécessaire. Souvent, on peut se contenter de solutions approximatives encadrant les différentes possibilités, mais, parfois, des calculs plus complexes sont nécessaires. On pense qu'avec le temps des méthodes de calcul affinées et réalistes deviendront si pratiques et si économiques qu'il sera possible de séparer la définition des critères de la méthode de calcul. Actuellement, cependant, on doit admettre que tel n'est pas le cas avec les méthodes classiques (voir Chapitre 6.0). L'importance des calculs exécutés pour l'étude du projet, et le choix des méthodes de calcul, sont du ressort de l'ingénieur chargé du projet, et sa responsabilité doit être engagée si son choix n'est pas adapté au problème et ne repose pas, visiblement, sur une bonne connaissance des pratiques modernes.

Dans ce qui suit, on s'attache à proposer une formulation raisonnable des critères de projet visant à atteindre les deux objectifs ci-dessus. Les méthodes et les hypothèses de calcul ne seront mentionnées qu'occasionnellement, à titre indicatif.

2.2 SCENARIOS DE PROJET ET METHODE DES COEFFICIENTS PARTIELS (COEFFICIENTS D'INCERTITUDE)

La réalisation satisfaisante des objectifs nécessite de définir toutes les conditions déterminant les comportements "normal" et "exceptionnel" (peu probable mais possible) du projet. Ces ensembles de conditions sont qualifiés actuellement de "scénarios d'utilisation" et de "scénarios de risque" respectivement (ou plus simplement, conditions normales et conditions exceptionnelles).

Le "scénario" définit, en détail, tous les paramètres qui pourraient, de près ou de loin, influencer le projet; en outre, il définit l'enveloppe la plus défavorable pour ces différents paramètres, que l'étude aura à considérer. Ces paramètres décriront les éléments suivants:

- charges ou conditions d'exploitation auxquelles l'ouvrage pourra être soumis;
- matériaux avec lesquels l'ouvrage est construit;
- matériaux sur lesquels l'ouvrage est fondé.

The second question concerns technical capabilities and presumes that under reliably conditions the analysis methods available will permit an accurate assessment of the complete behaviour of the dam and its foundations. Here the degree of professional confidence is higher and modern computational tools (together with physical modelling on reduced scale structural model) can be assumed to provide a reasonable answer for most problems encountered. Though some may consider this viewpoint over-optimistic it must be said that progressively more refined (and costly) analyses can be made to model complex physical situations. The degree of refinement necessary will however have to be always left to the designer. In many cases quite approximate solutions bounding the possibilities will suffice while in others extensive calculations may be necessary. It is believed that with time, refined, realistic methods of analysis will become so practical and economic that it will be possible to separate the specification of criteria from the method of analysis. For the time being however it has to be admitted that such is not the case with some conventional methods (see Section 6.0). The extent of the analyses and the methods used in the design computation must be determined by the engineer responsible for the design and he must shoulder the responsibility if his choice is inadequate for the problem at hand and does not demonstrate reasonable knowledge of the current "state of the art".

We shall therefore concentrate in what follows on suggesting a reasonable form of design criteria which concentrates on the achievement of the two objectives specified. Analysis methods or assumptions will only be mentioned occasionally as a guide to correct practice.

2.2 DESIGN SCENARIOS AND METHOD OF PARTIAL COEFFICIENTS (UNCERTAINTY FACTORS)

The satisfactory achievement of the objectives requires the specification of all relevant conditions for "normal" and "unlikely but possible" behaviour of the design. Such sets of conditions are known in current parlance as "utilisation scenarios", and "hazard scenarios" respectively (or simply "normal" and "extreme" conditions).

The "scenario" specifies in detail all the parameters which can possibly enter the design process and defines the most unfavourable range of such parameters which should be considered by the designer. Typically these parameters will describe:

- loads or operating conditions to which the system may be subjected;
- materials from which the structure is constructed;
- materials upon which the structure is to be founded.

Chaque paramètre peut être exprimé quantitativement par une valeur (souvent la moyenne) à laquelle est appliqué un **coefficient d'incertitude** (ou coefficient partiel). Dans le but de définir les critères du projet, on pourrait, en principe, définir un ensemble de coefficients d'incertitude (sous la forme d'un nombre supérieur à 1, utilisé pour multiplier ou diviser le paramètre donné en vue de définir une limite raisonnable). Si ce but peut être (et doit être) atteint pour orienter les études de façon acceptable, nous ne poursuivrons pas exclusivement dans ce sens dans le présent rapport, pour deux raisons:

- D'abord, une recherche et une discussion beaucoup plus importantes sont nécessaires pour établir des valeurs d'application générale, même pour les paramètres les mieux connus.
- Ensuite, beaucoup de paramètres (par exemple, les lois de comportement des matériaux) sont toujours discutés et ceux-ci peuvent souvent être définis sous différentes formes. Le choix des limites extrêmes définissant l'amplitude des variations possibles ou probables sera toujours du ressort de l'ingénieur chargé du projet.

L'utilisation des "coefficients d'incertitude" ou "coefficients partiels" mentionnés ci-dessus correspond à une approche "semi-probabiliste". Pour au moins un certain nombre de ces coefficients (par exemple, les caractéristiques de résistance mécanique des matériaux de construction), une approche purement statistique est possible et peut être incorporée dans la définition des paramètres.

L'étude des différents scénarios et la définition de l'enveloppe de conditions possibles et probables constituent un outil essentiel pour la mise au point de critères de projet corrects. Lors de l'établissement des scénarios, il faut consulter les publications sur les cas vécus et sur les expériences relatives au comportement des barrages, à court et à long terme, et notamment aux phénomènes dangereux.

Le choix entre "scénarios d'utilisation" et "scénarios de risque" peut être délicat; dans chaque cas particulier, l'ingénieur peut être amené à faire appel à son jugement basé sur son expérience et sur son interprétation des expériences des tiers. Le Comité propose la distinction suivante:

"Scénario d'utilisation"

Ensemble de conditions et d'événements possibles, pour lesquels les critères retenus pour le projet garantissent le bon comportement permanent du barrage et des ouvrages annexes, sans risque pour les personnes et les biens, moyennant un programme sérieux de surveillance et d'entretien périodiques.

Each parameter can be expressed quantitatively by a value (often the average) to which an **uncertainty factor** (or partial coefficient) can be assigned. The objective of specifying design criteria could, in principle, be accomplished by specifying a set of such uncertainty factors (as number greater than unity by which the particular parameter is multiplied or divided to define a reasonable limit) for each parameter. While such an objective can (and indeed should) be achieved as an acceptable guidance for dam designers; in the present report we shall refrain from doing so completely for two reasons:

- First: much further study and discussion is needed to establish generally applicable values even for well established parameters.
- Second: many parameters (such as those describing the constitutive properties of materials for instance) are not generally agreed upon and indeed alternative means of specification of these can often be used. The choice of extremes for the possible or probable ranges will always have to be decided by the designer.

The use of "uncertainty factors" or "partial coefficients" referred to above represents a "semi-probabilistic" approach. For a part at least of such factors (when for instance strength properties of construction materials are considered) a fully statistical approach is possible and can be incorporated in their specification.

The study of various scenarios and the definition of the range of probable and possible conditions is an essential tool in the development of appropriate design criteria. In preparing scenarios, reference should be made to the published literature covering case histories and experience of the short term and long term performance of dams and in particular to hazardous phenomena.

The choice between "utilisation scenarios" and "hazard scenarios" may not be easy and in each particular case may require judgement on the part of the designer based on his own experience and his interpretation of the experience of others. This Committee suggests the following distinction between the two:

"Utilisation scenario"

Encompasses the credible combination of conditions and events for which the selected design criteria will ensure, subject to serious periodic inspection and maintenance, the continuous satisfactory performance of the dam and its appurtenant works without risks to life or property.

"Scénario de risque"

Evénements résultant d'un ensemble de conditions ou d'événements, correspondant à la limite de la crédibilité et pour lesquels l'application correcte de critères de projet appropriés élimine le risque de dégâts catastrophiques.*

Dans les définitions ci-dessus, on ne tient pas compte de la possibilité, qui existe toujours, d'erreurs humaines, d'erreurs de calcul ou, plus simplement, de la présence d'accidents géologiques restés cachés malgré les reconnaissances. On ne connaît aucun moyen d'éliminer totalement ces situations et, tout compte fait, la profession d'ingénieur ressemble à celle de médecin, en ce sens qu'il faut compter sur la probité professionnelle. Cependant, un bon nombre de ces éléments étrangers au domaine de la sécurité proprement dite peuvent être minimisés ou même éliminés par la mise au point et la mise en oeuvre d'une stratégie qui couvre, notamment: le choix de l'ingénieur chargé du projet, la vérification, l'encadrement, le contrôle de la qualité, l'auscultation, la surveillance, etc.

2.3 "COEFFICIENTS D'INCERTITUDE" ET "COEFFICIENTS DE SECURITE"

Au début du présent rapport, on a fait allusion au fait que le terme "coefficient de sécurité", actuellement utilisé, est peu satisfaisant et l'on a présenté une distinction entre ce terme et le "coefficient d'incertitude" dont il est question dans le chapitre précédent.

Ainsi, dans le cas des barrages-voûtes par exemple, nous avons vu que le coefficient de sécurité est parfois défini comme une valeur, un coefficient par lequel il faut multiplier la seule charge hydrostatique pour provoquer la rupture du barrage (en compression). Une telle définition est basée sur une impossibilité physique puisque, compte tenu du niveau maximal de la retenue en cas de crue, il faudrait une augmentation du poids spécifique de l'eau pour atteindre cette charge.**

Cette valeur, comprise souvent entre 4 et 8, n'est guère un moyen de chiffrer le niveau de sécurité du barrage.

Pour les barrages-poids, on adopte une définition analogue pour le "coefficient de sécurité à la rupture par glissement", exprimé en fonction de la composante horizontale de la charge hydrostatique (la valeur dans ce cas est comprise entre 2 et 4).

* Au sujet des scénarios de risque, il peut être utile, sans faire preuve de légèreté, d'attirer l'attention sur une loi très connue des anglo-saxons, et attribuée à Murphy: "Si quelque chose peut se produire, elle se produira".

** Sauf, bien sûr, en cas de surcharge du type Vajont, due au glissement du versant dans la retenue.

"Hazard scenario"

Encompasses events resulting from combinations of conditions or events which represent the limit of credibility and for which the proper application of appropriate design criteria will eliminate the risk of catastrophic damage.*

In the above definitions we have excluded the ever present possibility of human misjudgement, computation mistakes, or simply the existence of some geological features which remained undiscovered despite normal site investigations. We know of no foolproof method by which these can be completely avoided and in the end in engineering as in medicine there is no substitute for professional integrity. However, many of these "non safety" elements can be mitigated if not eliminated by the development and application of a safety strategy which covers such things as choice of designer, checking, qualified supervision, quality control, instrumentation, surveillance, etc.

2.3 "UNCERTAINTY FACTORS" VERSUS "SAFETY FACTORS"

At the beginning of this report allusions have been made to the unsatisfactory nature of the word "safety factor" currently used and to the difference between it and the uncertainty factor mentioned in the preceding section.

Thus, for instance in the case of arch dams, we have seen on occasion the safety factor defined as the number by which the water load alone can be multiplied before (compressive) failure of the whole arch occurs. Such a definition assumes the impossible i.e. the increase of the water load which, with maximum flood level assumptions, could only be increased by changing its specific gravity.**

This number, frequently in the range of 4-8, has little to do with the quantification of the dam safety.

For gravity dams a somewhat similar definition is adopted for the "sliding factors" when a safety factor (now in the range of 2-4) is given in terms of the increase of the horizontal (water) thrust.

* In the writing of such hazard scenarios it may perhaps be appropriate, without undue flippancy, to refer to the well known Murphy's law which simply states "If it can happen it will".

** Excluding, of course, such overloads as have occurred at Vajont due to failure of reservoir slopes.

Par contre, pour un barrage en terre, le coefficient de sécurité s'apparente plutôt au **coefficient d'incertitude** présenté ci-dessus. En effet, il est égal au coefficient par lequel il faut réduire la résistance au cisaillement du matériau adoptée dans le calcul pour que la rupture du barrage se produise pour les charges données. Dans ce cas, la probabilité de rupture sera faible si la probabilité d'une réduction (même petite) de la résistance au cisaillement adoptée est faible.

Le fait que les coefficients de sécurité définis dans les trois cas précités sont très différents ne signifie nullement que les barrages-voûtes ou poids sont plus sûrs. Il s'agit simplement de différentes façons de définir ces coefficients, la première définition supposant, à tort, qu'une augmentation de la charge d'eau est possible. On peut noter que, pour un barrage-poids, une augmentation proportionnelle des charges de gravité et de poussée conduirait à une valeur constante du coefficient de sécurité pour un coefficient de frottement donné.

La différence entre ces deux définitions du coefficient de sécurité sera peut-être plus évidente en considérant que la résistance du matériau de fondation est donnée par deux paramètres:

$$= c + n \tan \phi$$

c = cohésion

n = contrainte normale

ϕ = angle de frottement interne

Dans la méthode de calcul faisant appel aux "coefficients d'incertitude" (coefficients partiels), l'incertitude sur les valeurs adoptées pour la cohésion c et pour $\tan \phi$ et sur leurs valeurs minimales probables est caractérisée par des coefficients différents. Les valeurs de ceux-ci sont parfois très différentes puisque, dans certains cas, la cohésion peut disparaître presque totalement tandis que $\tan \phi$ varie peu.

Dans l'exemple du barrage-voûte ci-dessus, le coefficient de sécurité pourrait être interprété de la même façon que celui du barrage en terre, c'est-à-dire comme un coefficient de réduction appliqué à la résistance à la compression du béton. Les deux définitions seraient ainsi plus rapprochées l'une de l'autre, mais il serait alors évident que le mécanisme de rupture étudié (rupture à la compression du béton) n'est pas le mécanisme critique. On sait que la rupture d'un barrage-voûte commence par des cisaillements dans la zone des appuis. Il convient ainsi d'étudier spécifiquement la résistance au cisaillement des surfaces de glissement potentiel.

On the other hand for an earth dam the definition of the safety factor is more akin to that of the **uncertainty factor** introduced above. It is, in fact, equal to the uncertainty factor by which the shear strength of the material as adopted for analysis can be divided before the failure of the dam can occur under the defined loads. If the possibility of even a small reduction of the adopted shear strength is small then equally the probability of failure is small.

The fact that safety factors defined in the three cases mentioned above are vastly different does not, by itself, signify a greater safety for arch or gravity dams. It is merely a matter of definition; the former quite incorrectly assuming that an increase of the water force is possible. It is worth observing that in the case of the gravity dam proportional increase of both the thrust and gravity load would in fact result in a constant factor of safety for a given friction coefficient.

The difference between the two definitions becomes perhaps clearer if we consider the strength of the foundation material to be defined by two parameters as:

$$= c + n \tan \phi$$

c = cohesion

n = normal stress

ϕ = angle of internal friction.

In the "uncertainty (or partial) factor" method of analysis separate factors would be assigned for the uncertainty associated with the selected values for cohesion c and $\tan \phi$ and their minimum likely values. Indeed in such cases it may be appropriate to use widely different factors as the cohesion may, under some conditions, be reduced to an insignificant value with little if any change in $\tan \phi$.

In the example of the arch dam cited the factor of safety could have been interpreted in a similar way to that used for an earth dam, i.e. as a factor to be applied to the concrete compressive strength. This would have brought the two definitions closer but it would also have pointed to the fact that the collapse mechanism assumed (failure of concrete under compression) was not the critical one. It is well known that the failure in arch dams would be initiated by shear deformations in the abutment areas. Therefore shear strength on surfaces of potential sliding should be independently assessed.

3. SCÉNARIOS D'UTILISATION (CONDITIONS NORMALES)

Les cas de charge qui se produisent fréquemment, ou qui sont raisonnablement prévisibles au cours de la vie de l'ouvrage, font partie des scénarios d'utilisation. Ils sont fondamentaux aux études et aux calculs.

Les caractéristiques des matériaux de construction et de toutes les zones de fondation, qui jouent un rôle actif dans la tenue de l'ouvrage, interviennent dans les calculs. Dans les scénarios, on prévoit l'enveloppe des caractéristiques prévues au début du chantier ou connues au cours des travaux, ainsi que les variations de celles-ci provoquées par l'environnement ou leurs évolutions dans le temps, pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

Les scénarios englobent l'évolution des conditions affectant le barrage et sa retenue, à partir des travaux de préparation de la fondation, et comprenant:

- la montée du remblai ou du béton et le comportement de la fondation sous ce chargement progressif (en tenant compte des variations saisonnières de l'avancement des travaux),
- l'évolution et les variations du régime thermique des barrages en béton,
- les variations des caractéristiques mécaniques des matériaux et de la fondation, en fonction du temps et des contraintes appliquées,
- l'évolution des pressions interstitielles et des percolations dans les vides au sein des matériaux et de la fondation, sans négliger l'influence des traitements naturels ou artificiels s'opposant à ces phénomènes (injections et drainage, filtres, etc.) et les conséquences des modifications d'ordre chimique,
- le premier remplissage (y compris les remplissages partiels dus aux crues survenant pendant le chantier); ensuite, les marnages raisonnablement prévisibles dus aux crues et à l'exploitation de la retenue,
- le dépôt progressif de sédiments dans la retenue et son influence sur les charges appliquées aux ouvrages et sur le fonctionnement hydraulique des organes d'évacuation (y compris les évacuateurs de secours),
- les secousses sismiques agissant sur la retenue, sur ses versants, sur l'ouvrage et sur sa fondation et susceptibles de se produire au cours de la durée de vie de l'ouvrage,

3. UTILISATION SCENARIOS (NORMAL CONDITIONS)

Loads which occur frequently or which can reasonably be expected to occur in the life of the dam form part of the utilisation scenarios. They are basic to the analyses and calculations.

The properties of the construction materials and of all zones of the foundation which play an active role in supporting the structure will also be involved in the analyses. The scenarios should encompass the range of properties to be expected at the time of construction or actually revealed during construction and the change in those properties which may occur with environmental variations and with time throughout the life of the structure.

The scenarios should encompass the evolution of conditions throughout the life of the structure and reservoir area commencing with foundation preparation and including:

- the successive addition of material during construction and the reaction of the foundation to that loading including seasonal variations in construction progress,
- the development and variations in the thermal regime of concrete dams,
- the time and stress related changes in the structural properties of the construction and foundation materials,
- the evolution of interstitial hydrostatic pressures in and seepage through the voids of the construction materials and foundations including the effects of natural or artificial control (grouting and drainage, filters, etc.) and the consequences of chemical alterations,
- the first hydrostatic loading of the structure, including partial loading, due to flooding during construction and the subsequent credible variations due to reservoir operation and flood inflows,
- the accumulation of sediment within the reservoir and its influence on the physical loading of structures and the hydraulic performance of service and emergency outlets,
- seismic excitation of the reservoir, reservoir slopes, structure and its foundations which will probably occur in the lifetime of the structure,

- les variations climatiques et leurs conséquences sur les régimes thermiques de l'ouvrage, sur la stabilité des talus naturels et artificiels dans la retenue et aux abords de l'ouvrage, sur l'action des vagues dans la retenue, sur l'érosion provoquée par le passage des crues et par les pluies intenses, sur l'action de la glace, etc.; tous ces effets sont à prévoir pour toute la durée de vie de l'ouvrage.

Dans cette énumération figurent les paramètres les plus significatifs à considérer pour l'élaboration de scénarios réalistes. En outre, chaque projet peut faire intervenir un certain nombre de conditions particulières. En général, il s'agit de prévoir l'action conjuguée des phénomènes prévisibles permettant d'établir un ensemble de critères en vue de garantir le fonctionnement sûr et fiable de l'ouvrage pendant toute sa durée de vie.

- the range of climatic conditions and its effects on thermal regimes of the structure, stability of natural and excavated slopes in the reservoir and around the structure, wave action on the reservoir, erosion due to flood passage and intense rainfall, ice action, etc. as are likely to occur in the lifetime of the structure.

These are but some of the more important parameters which should be taken into consideration in developing realistic scenarios. Each project may have special conditions which should be considered in the process. Generally speaking, the utilisation scenarios involve the combination of credible events or conditions from which design criteria are established to ensure safe and reliable operation of the dam throughout its useful life.

4. SCÉNARIOS DE RISQUE (CONDITIONS EXCEPTIONNELLES)

L'expérience a montré que les conséquences des erreurs humaines pendant la construction, la mise en service, l'exploitation et l'entretien d'un barrage et de ses ouvrages annexes tenaient une grande place dans les scénarios de risque.

De plus, dans la catégorie "risques", il faut considérer les combinaisons incroyables (ou à la limite de la crédibilité) de conditions extrêmes relatives aux phénomènes du type figurant dans les scénarios d'utilisation.

Dans la catégorie des erreurs humaines ou équivalentes, on peut citer:

- non-conformité de l'exécution aux dispositions essentielles des spécifications techniques,
- pendant les travaux, absence de prise en compte des conditions de fondation différentes des hypothèses de calcul ou critères de projet,
- interprétation erronée des résultats d'auscultation pendant les travaux; arrêt des mesures ou des interprétations après la mise en service du barrage,
- absence de contrôles et de visites détaillés des ouvrages et du site pendant la première mise en eau, pendant l'exploitation (visites périodiques) et immédiatement après les anomalies ou événements exceptionnels,
- non-exécution des travaux essentiels d'entretien ou de réparation, recommandés après les visites,
- exploitation non conforme aux consignes; absence de contrôles pour s'assurer du bon fonctionnement des organes essentiels,
- impossibilité d'accès aux organes essentiels sous des conditions climatiques extrêmes, d'où impossibilité de garantir le bon fonctionnement de ces organes.

L'établissement de la liste intégrale des scénarios de risque nécessiterait une étude complète des expériences, publiées ou non, des phénomènes capables de provoquer la rupture ou des incidents graves, de mettre les barrages hors service, de compromettre leur bon comportement, ou susceptibles de conduire à la rupture faute de la mise en oeuvre rapide de mesures curatives.

4. HAZARD SCENARIOS (EXTREME CONDITIONS)

Experience has shown that events resulting from human error during construction, commissioning and subsequent maintenance and operation of a dam and its appurtenant works are major contributors to hazard scenarios.

Also in the "hazard" category should be considered incredible (or at the limit of credibility) combinations of extremes of the events of the type referred to under Utilization Scenarios above.

Included in the category of human error or equivalent may be, among others:

- failure to identify and respect critical requirements of specifications during construction,
- failure to recognize, during construction, foundation conditions which are at variance with the assumptions made or criteria used for design,
- failure to interpret correctly the instrument readings made during construction or to continue to take and interpret readings during subsequent operation,
- failure to carry out detailed inspections of the structures and site during first reservoir filling, regularly during operation and immediately following the occurrence of unusual events during the life of the structure,
- failure to carry out critical maintenance or corrective measures recommended following inspections,
- failure to operate facilities in accordance with prescribed instructions or to ensure that critical facilities are always operational,
- loss of access to critical facilities under severe climatic conditions and hence failure to ensure their correct operation.

The preparation of a complete list of hazard scenarios would require an exhaustive review of published and unpublished experience of events that lead to failures or dangerous situations, that put dams out of service, affect behaviour or performance or which may have lead to failure but for the remedial measures which were promptly taken.

Certains éléments ci-dessus sont du ressort d'autres Comités de la CIGB (Sécurité, Risques aux tiers, Détérioration, Matériaux, etc.). Cependant, ils sont tous essentiels aux études de projet et, pour cette raison, ils doivent être pris en considération dans le présent rapport.

Certains éléments peuvent être traités par l'ingénieur chargé du projet, dans le choix et l'application des critères. On peut souvent éviter une mauvaise application des spécifications techniques si celles-ci sont rédigées avec précision. Par exemple, pour un barrage en remblai, si la ségrégation des matériaux dans certaines zones critiques peut compromettre la sécurité, on peut modifier les dispositions concernant la granulométrie des matériaux adjacents afin d'éliminer la possibilité de ségrégation importante, sans demander à l'ingénieur de chantier d'interpréter le mot "ségrégation". De même, pour éviter le risque de non-fonctionnement, au moment voulu, d'organes mécaniques essentiels, on peut prévoir un supplément de revanche, des alimentations de secours, des dispositifs de secours, ou même, l'élimination pure et simple de tels dispositifs (adoption de déversoirs à seuil libre, etc.).

Mais certains risques découlant d'autres rubriques figurant dans l'énumération ci-dessus ne peuvent pas être éliminés par le projeteur dans son choix des critères. Ils font intervenir des éléments relatifs à l'organisation, à l'administration, à l'exploitation, qui interviennent dans les risques dans la mesure où ils ne réagissent pas aux situations qui peuvent être critiques; ainsi, ils sont réellement des éléments d'une stratégie de sécurité mentionnée ci-dessus. Néanmoins, ils renforcent la nécessité d'associer l'ingénieur du projet directement aux travaux de construction, dans la mesure où il pourra s'assurer que l'on respecte les critères, ou modifier les critères pour tenir compte des conditions particulières révélées pendant les travaux.

Some of the items listed above come into the sphere of activity of other ICOLD Committees (safety, risks to third parties, deterioration, materials, etc.). However, all are essential features of the design process and as such must be considered here.

Some of the items can legitimately be treated by the designer in the choice and application of criteria. It is often possible to avoid misapplication of the specifications by eliminating vague requirements. For example, if, in an embankment dam, segregation of materials in critical areas could jeopardise security, then the criteria for the gradations of adjacent materials could be modified to eliminate the possibility of unacceptable segregation without leaving the interpretation of "segregation" to the construction engineer. In addition, lack of assurance of the timely operation of critical mechanical facilities for whatever reason may be covered by the adoption of criteria which involve excess freeboard, "back-up" energy sources, fail safe emergency systems, or even the elimination of such facilities (use of free crest spillways) etc.

Many of the risks involved in other items listed above cannot be resolved by the designer in his choice of criteria. They involve organisational, administrative or operational systems and procedures which are responsive to the risks involved in failing to react to situations which may be critical and are really elements of a safety strategy referred to above. However, they reinforce the need to have the designer involved in establishing operational procedures and directly associated with the construction to the extent that he can assure himself that the criteria are being met at all times or can modify criteria as appropriate to deal with particular conditions revealed during construction.

5. QUELQUES RECOMMANDATIONS SPÉCIALES

5.1 RESULTATS DES CALCULS

L'influence des différentes hypothèses (charges, caractéristiques des matériaux), en vue de vérifier que le projet répond aux objectifs mentionnés dans le Chapitre 2.1 ci-dessus, est toujours contrôlée par des calculs, éventuellement associés à des essais sur modèle réduit. Ces derniers sont parfois utiles pour étudier l'influence de volumes en plus ou en moins (évacuateurs de crue, vidanges, ouvertures de forme complexe, etc.).

Dans l'éventail des méthodes de calcul dont on dispose, la plus sophistiquée correspond au calcul non linéaire par éléments finis, à l'aide de modèles mathématiques très élaborés, intégrant des lois de comportement complexes pour les matériaux. A l'autre extrémité de la gamme, on trouve les calculs simples d'état-limite ou de mécanisme de rupture. Les deux approches sont utiles, et les moyens intermédiaires (calcul en élasticité linéaire) ont été et continuent d'être utilisés avec succès, en particulier pour les petits ouvrages sur des fondations résistantes et relativement homogènes.

Dans ce contexte, il est entendu que les calculs traitent simultanément du barrage et de sa fondation.

Moyennant un choix correct des paramètres et des modèles de comportement pour les matériaux constitutifs du barrage et de sa fondation, les calculs par éléments finis donneront toujours une évaluation plus ou moins correcte de l'ordre de grandeur des déplacements, et ce sont les résultats de ces calculs qui détermineront essentiellement si le projet est acceptable. En vérité, ce sont généralement les déplacements qui déterminent si le projet est manifestement acceptable ou non, surtout si la fissuration est considérée comme une forme discontinue de déplacement. L'augmentation anormale des fuites ou la perte d'étanchéité résultent généralement des déplacements par fissuration (y compris des érosions internes dans les barrages en terre), et c'est pour cette raison que nous en parlons ici. Le calcul d'état-limite est limité à la prévision de mouvements continus et étudie les conditions conduisant au déplacement libre et infini - état que l'on qualifie de "rupture". Il est évident qu'à partir du moment où cet état est atteint ou est imminent, la poursuite du calcul détaillé de déplacements devient inutile.

5. SOME SPECIAL RECOMMENDATIONS

5.1 RESULTS OF ANALYSES

The effect of the various load and material assumptions to verify the compliance of the design with the objectives outlined in section 2.1 will invariably be tested by some form of computation occasionally aided by physical models. Such physical models may assist in the investigation of the effects of added or subtracted masses (spillways, outlets, complex openings, etc.).

Full nonlinear analysis utilizing sophisticated finite element computer programs and introduction of complex material modelling presents an extreme of the spectrum of analysis methods. The other extreme is the simple limit load or collapse mechanism approach. Both have their role to play and the intermediate picture of linear elastic analysis has and continues to be used with success, particularly for small structures on strong and relatively homogeneous foundations.

When in the above context the word "analysis" is used it means, of course, a procedure which investigates the foundations and dam simultaneously.

Subject to the proper selection of parameters and behaviour models for structure and foundation materials the full finite element analysis procedures will always result in a more or less reliable prediction of displacement magnitudes and it is these that should mainly govern the acceptance of the design. Indeed it is the displacements which will generally determine the visible acceptability of design, especially if cracking is interpreted as a discontinuous form of displacement. Unpredicted leakage or loss of water containment is generally associated with cracking displacements (including internal erosion in an earth dam) and is therefore included here. Limit load type of analysis predicts only the possibility of continuous movement and determines the conditions for uncontrolled, unlimited displacement which is referred to alternatively as "collapse". Clearly if at any stage such collapse conditions are reached or are evidently in progress then there is little point in pursuing a detailed displacement analysis.

Jusqu'ici nous n'avons pas parlé des niveaux des contraintes obtenues dans les calculs, ou des valeurs maximales admissibles pour celles-ci. La raison en est simple: les contraintes ne sont observables qu'à travers les effets qu'elles provoquent (déformations) et sont ainsi dénuées d'intérêt propre. Cependant, on peut déduire beaucoup de renseignements des valeurs des contraintes en jeu. Par exemple, si l'on constate que la valeur des contraintes est partout "confortable" (inférieure aux contraintes maximales que le matériau peut supporter sans rupture), on peut, dans certains cas, en déduire que la stabilité est assurée, malgré l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices (élasticité linéaire). De plus, à partir d'un tel calcul, on peut décider si les déplacements seront suffisamment faibles pour être acceptables. C'est là la justification de la plupart des calculs en élasticité linéaire exécutés de nos jours, et cette technique restera valable, au moins pour l'étude de barrages en béton, de faible hauteur, construits sur une fondation résistante.

Par contre, nous verrons plus loin, en particulier pour les grands barrages en béton reposant sur des fondations complexes, que ce critère de contrainte maximale admissible est rarement vérifié dans un calcul élastique qui ne tient pas compte de la fissuration, et il est nécessaire d'introduire le comportement non linéaire provoqué par celle-ci.

Si les "contraintes" ne sont pas directement observables en général, il y a une exception: la pression de l'eau remplissant les vides et les fissures. Il est absolument nécessaire que le calcul prouve que les pressions interstitielles n'atteignent pas des niveaux excessifs, car elles sont la cause de ruptures localisées, de fuites, et même de rupture généralisée.

5.2 COEFFICIENTS D'INCERTITUDE (COEFFICIENTS PARTIELS) QUELQUES RECOMMANDATIONS

Nous avons déjà dit que le Comité n'est pas encore en mesure de proposer des valeurs pour les coefficients d'incertitude qu'il pourrait recommander, sans réserve, pour l'établissement de projets corrects. Cependant, on peut suggérer une enveloppe possible pour au moins quelques-uns des paramètres les plus courants. Dans la liste ci-dessous, les conditions d'application sont désignées par U pour les conditions normales d'utilisation et par H pour les conditions exceptionnelles ou de risque.

5.2.1 Charges

Poids propre des matériaux: On peut opérer une réduction ou une augmentation de la valeur moyenne prévue, en fonction de l'importance du poids propre dans les résultats du calcul pour les conditions statiques et dynamiques. Un coefficient de 1,0 à 1,2 est raisonnable pour les conditions U et H.

Le chargement progressif dans les phases de construction doit être suivi ou, du moins, il faut tenir compte des conséquences de ce chargement par un calcul adéquat.

So far nothing has been said about stress levels recorded in the analysis or about their permissible values. The reason for this is simply that these are never observable except by their effects (deformation) and therefore directly are of no concern. However, much can be inferred from their values. If for instance it is found, even with simplifying linear elastic assumptions, that their magnitude is everywhere "safe" i.e. below the maximum value of stresses that the material can sustain without rupture, then under certain circumstances it is possible to infer that no collapse will occur. Indeed it is possible by such analysis to decide whether the displacements will be sufficiently small to pass the acceptance test. It is for such reasons that most linear elastic analyses are today justified and will continue to be used at least for small concrete dams on competent foundations.

However, we shall note presently that, particularly in large concrete dams with complex foundations, such stress limits are seldom satisfied by an elastic analysis which ignores cracking and the nonlinearity caused by this has generally to be introduced.

Although the "stress" is generally unobservable, one component of it is i.e. the water pressure in the pores and cracks. It is of considerable importance that the analysis shows that excessive values of such pore or crack pressure are not developed as these can lead to localized failure and water loss or even general failure.

5.2 UNCERTAINTY FACTORS (PARTIAL COEFFICIENTS). SOME RECOMMENDATIONS

As mentioned before, the Committee is not ready at this stage to quantify the values of uncertainty factors which could be recommended unequivocally as a guide to acceptable design. Nevertheless a possible range of factors can be suggested for at least some of the commonly encountered parameters. Some suggestions are listed using (U) to describe utilisation of normal conditions and (H) to describe hazard or extreme conditions.

5.2.1 Loads

Dead weight of material: Here a reduction or increase of the average predicted value may be used depending on the significance of dead weight in the results of the analysis for both static and dynamic conditions. A factor of 1.0 - 1.2 is reasonable for both (U) and (H) conditions.

The sequence of construction in the application of gravity should be followed or at least its effects allowed for by suitable analysis.

Charges d'eau: Normalement, on peut prévoir, de manière assez précise, les niveaux d'eau amont et aval, en exploitation normale et pour différentes conditions de crues (U), ainsi que les pressions correspondantes appliquées au barrage et au fond de vallée.

Ces niveaux étant connus, il n'est pas nécessaire d'appliquer un coefficient à la charge hydrostatique en condition U.

Pour les conditions extrêmes exceptionnelles (H), il s'agit seulement de calculer, en plus, les niveaux d'eau "catastrophiques" éventuellement provoqués par une crue très exceptionnelle, par l'effondrement d'une montagne ou par une avalanche dans la retenue (des cas sont connus). Actuellement, nous n'avons pas d'avis sur la meilleure façon de tenir compte de ces incidents - mais il est évident que leur probabilité est justiciable de l'étude et du calcul. Les événements exceptionnels (chute d'un météorite dans la retenue, ...) entrent probablement dans la catégorie des "risques acceptables", du fait qu'on peut les considérer comme étant au-delà de la limite de crédibilité.

Alluvionnement: A la longue, les dépôts d'alluvions dans le réservoir appliquent une charge supplémentaire sur la face amont du barrage. Pour les barrages en béton, l'effet est défavorable à la stabilité, mais, pour les digues en remblai, il est parfois positif. L'alluvionnement peut avoir une influence plus grave, en ce qui concerne l'obstruction des vidanges. Le calcul de l'alluvionnement progressif en fonction du temps peut s'avérer délicat et peu précis, mais on peut tenir compte des conséquences de ce phénomène par l'introduction, dans l'évaluation des charges, de coefficients d'incertitude appropriés. La valeur du coefficient peut être différente dans les deux conditions (U) et (H).

Sous-pressions et pressions interstitielles: Ces deux phénomènes correspondent à des charges hydrauliques appliquées dans les interstices des matériaux constitutifs du barrage et de la fondation. Ils peuvent avoir des conséquences importantes:

- a) réduction des contraintes effectives sur les surfaces de mouvement potentiel,
- b) saturation des sols cohérents (et par là, réduction de la cohésion),
- c) variation du volume du matériau (tassements, consolidation, etc.) lorsque ces pressions sont dissipées par drainage.

Parmi les facteurs permettant le développement des pressions interstitielles, on peut citer:

- charge d'eau de la retenue,
- circulation des eaux souterraines dans les appuis et dans la fondation,
- conditions de mise en place des terres dans le barrage, application ultérieure des charges,

Water loads: Reservoir and tailwater levels for normal operation and for a range of (U) flood conditions can usually be predicted within close limits as well as the corresponding loads applied to the dam structure and valley floor.

With such levels specified it is unnecessary to apply any factor for water load (U) condition.

For extreme hazard situations (H) the only difference is the estimating of "catastrophic" water levels which may be caused by a very special flood magnitude, collapse of a mountain or an avalanche slide into the reservoir (such as has happened). We have no views on how at present all such latter events should be accounted for - though of course the potential for their occurrence is amenable to investigation and analysis. Extreme events such as meteorite impact on a reservoir are probably in the "accepted risk" category as they may be considered to be beyond the limit of credibility.

Silt loads: Sedimentation in the reservoir will, with time, introduce additional loading against the upstream face of the dam. This loading will have a destabilizing influence on concrete structures but, occasionally, may improve the stability of embankment dams. However, the effect of sediments may be more serious with respect to the potential plugging of important reservoir outlets. Prediction of silt levels and their evolution with time may be difficult and imprecise but their effect can be taken into account by suitable uncertainty factors in load estimations. Different values of factor for (U) and (H) conditions might be assumed.

Uplift and pore pressures: Uplift and pore pressures are effectively water loads within the interstices of the materials of the structure and its foundation which have several important effects:

- a) the reduction of effective stresses on surfaces of potential movement,
- b) the saturation (and hence reduction in cohesive strength) of cohesive soils,
- c) the change in volume (settlement, consolidation, etc.) of the host material when dissipation of pressure occurs due to drainage.

Pore pressure development may be governed by:

- the reservoir head,
- groundwater flow in abutments and foundations,
- the placing condition and subsequent loading of embankment soils.

- charges appliquées à la fondation.

Pour réduire ces pressions à un niveau acceptable, on dispose des injections d'étanchéité (ou de divers types de parafouille) et du drainage, ou de l'association des deux moyens. Les pressions hydrostatiques internes et les percolations qui y sont associées peuvent varier dans le temps par suite:

- a) de détérioration du béton (vieillessement, chargement, gel-dégel, etc.),
- b) de lessivage de sels solubles dans le barrage ou la fondation (y compris les coulis d'injection),
- c) d'érosion interne de la digue en remblai ou de la fondation,
- d) de colmatage progressif du réseau de drainage ou des exutoires par des dépôts formés chimiquement ou par des produits d'érosion,
- e) de désordres provoqués par un séisme,
- f) d'action dynamique des séismes, conduisant aux phénomènes de liquéfaction.

L'état des pressions hydrostatiques internes peut être calculé pour un chargement dynamique aussi bien que statique; les **coefficients d'incertitude** concernent seulement les caractéristiques des matériaux (et des écrans d'étanchéité), notamment la structure des vides et les coefficients de perméabilité. La valeur absolue de ceux-ci est peut-être moins intéressante que les valeurs relatives (incluant les variations en fonction du temps) admises pour les différentes zones, et un seul coefficient d'incertitude sera alors insuffisant pour leur définition. L'ingénieur pourra être amené à appliquer des coefficients d'incertitude aux coefficients de perméabilité adoptés, compte tenu de la ségrégation pouvant se produire à l'intérieur ou au contact entre zones, ou du lessivage éventuel dans la zone des exutoires.

Glace: Dans les pays froids, les charges appliquées par la glace sont parfois des éléments essentiels dans l'étude du barrage et des ouvrages annexes: ce sont des charges statiques (dilatation thermique d'une nappe continue de glace) ou dynamiques (chocs des plaques de glace lors du fonctionnement de l'évacuateur de crue ou sous l'action du vent). Il est difficile de calculer ces charges avec précision.

Température: Les variations de température d'un barrage en béton, pendant sa construction et pendant la vie de l'ouvrage, peuvent conduire à des variations importantes des contraintes susceptibles de compromettre la tenue de l'ouvrage. Elles sont fonction:

- a) de la température de la fondation lors de la mise en place du béton,
- b) du ciment utilisé (type, dosage),
- c) de la vitesse de construction,

- the external loading of the foundations.

It may be controlled to predictable values by grouting (or cut offs of various types), drainage or a combination of the two. Internal hydrostatic pressures and associated seepage may change with time due to:

- a) deterioration of structure concrete from ageing, loading, freezing and thawing, etc.,
- b) the saturation (and hence reduction in cohesive strength) of cohesive soils,
- c) internal erosion of embankment or foundation materials,
- d) progressive sealing of drainage systems or seepage outlets due to deposition of chemicals or products of erosion,
- e) dislocations caused by seismic events,
- f) dynamic action of earthquakes leading to liquefaction phenomena.

Both in static and dynamic loading the internal hydrostatic pressure state can well be predicted by computation and **uncertainty factors** concern only the material properties (including those of artificial water barriers) and in particular their void structures permeability coefficients. The actual value of such coefficients may be of lesser importance than the relative values (including changes with time) assumed in different parts of the system and a single uncertainty factor may not be sufficient for their definition. The designer may well have to take into account the segregation which can occur within or at the interface between zones or the leaching action which can take place near the exit zones of the flow and apply factors for the permeability coefficients adopted.

Ice load: In cold climates, static loads (due to thermal expansion of a continuous ice sheet) or dynamic loads (due to impact of floating ice sheets during spillway operation or under the effect of wind) may be significant for the design of the dam or its appurtenant structures. Such loads are difficult to predict with precision.

Temperature: Variations in temperature which occur in concrete dams during construction and subsequently throughout the life of the structure may introduce significant stress changes which are important to its structural integrity. These are a function of:

- a) the foundation temperature at the time of placing concrete,
- b) the type and content of cementitious material,
- c) the rate of construction,

- d) de la géométrie de l'ouvrage, de la hauteur des levées, et des dimensions des plots,
- e) des conditions climatiques pendant le chantier,
- f) de la température du béton à la mise en place et au moment du clavage des joints,
- g) de l'utilisation ou non de dispositifs de refroidissement (ou de calorifugeage),
- h) de l'exposition aux rayons solaires des surfaces définitives en béton,
- i) de la vitesse du premier remplissage de la retenue et des températures de l'eau et de l'air régnant durant le remplissage,
- j) du régime thermique de la retenue, à long terme,
- k) des conditions atmosphériques du site, à long terme.

Aujourd'hui, on sait calculer ces variations de température avec une très bonne précision. Du point de vue de la tenue de l'ouvrage, ces variations thermiques (associées ou non à d'autres effets volumiques) peuvent provoquer des fissurations telles que le calcul de stabilité effectué avec l'hypothèse d'un milieu homogène ne sera plus valable.

Pour les conditions normales (U), on peut multiplier l'état thermique adopté (et ses effets) par un coefficient compris entre 1,1 et 1,5.

Dans le cas des conditions exceptionnelles (H), on peut tenir compte au mieux des phénomènes thermiques en supposant une préfissuration du béton dans certaines zones pour réduire ainsi à zéro sa résistance à la traction.

Pour les barrages en remblai à noyau central, les variations thermiques ont peu d'influence sur la tenue de l'ouvrage; on s'y intéresse seulement en ce qui concerne la détérioration des niveaux supérieurs du matériau du noyau (soulèvement dû au gel, ramollissement, séchage, fissuration).

La tenue des barrages en remblai à masque amont est plus sensible aux variations thermiques. Pour les masques en béton bitumineux, des variations importantes peuvent provoquer des détériorations, et les dalles rigides en béton sont sujettes à la fissuration.

Charges dynamiques: Au cours de ces dernières années, l'opinion publique et l'attention des chercheurs ont donné une place spéciale au problème de la résistance des barrages aux effets dynamiques des séismes. Pour les sites non recoupés par une faille active, on détermine maintenant un "séisme de projet" (U) et un "séisme exceptionnel (maximal possible)" (H) à adopter dans l'étude du projet.

- d) the physical form of the structure, height of lifts and size of monoliths,
- e) the climatic conditions during construction,
- f) the temperature of the concrete at time of placing and at the time of joint grouting,
- g) the use of artificial cooling (or insulation),
- h) the exposure of permanent concrete surfaces to solar radiation,
- i) the rate of first reservoir filling and the prevailing water and air temperatures during filling,
- j) the long term thermal regime of the reservoir,
- k) the long term atmospheric conditions at the site.

It is now possible to estimate these temperature variations with considerable precision. From the point of view of structural integrity, the temperature changes, combined or not with other volumetric effects, can cause cracking which may become so significant that the structural analysis originally made for a homogeneous body ceases to be valid.

The temperature state assumed (and its effects) can well be multiplied by a factor ranging from 1.1 - 1.5 when normal (U) conditions are considered.

For the analysis of extreme (H) conditions the temperature effects can be best introduced by assuming precracking of the concrete in appropriate zones and thus reducing its tensile strength to zero.

Temperature changes for embankment dams with central cores have little, if any, structural significance and normally are of concern only in relation to deterioration of the upper levels of the core material (frost heave and softening or drying out and cracking).

The integrity of embankment dams with upstream membranes is more sensitive to temperature changes. Asphalt membranes may deteriorate under wide temperature variations and cracking may occur in rigid concrete decks.

Dynamic loads: Resistance of dams to the dynamic effects of earthquakes has assumed special importance in recent years due to public opinion and scientific interest. At sites which are not intersected by active faults, current practice is to establish a "Design Basis Earthquake DBE" (U) and a "Maximum Credible Earthquake - MCE" (H) for design purposes.

Dans un autre rapport, le Comité a étudié comment ces séismes agissent sur l'ouvrage et sur sa fondation en provoquant des pressions interstitielles excessives; le calcul non linéaire est le moyen le plus rationnel pour arriver à une prédiction fiable de leurs effets.

Pour l'étude déterministe des effets d'un séisme, il est généralement nécessaire de définir l'ensemble de l'historique du séisme (plutôt que ses caractéristiques particulières). Puisque les séismes "de projet" et "exceptionnel" sont connus de façon seulement aléatoire, il sera peut-être nécessaire d'adapter le projet à différents séismes possibles; on ressent un grand besoin d'étude supplémentaire dans ce domaine.

Combinaisons de charges: La définition des hypothèses de charges repose sur le choix d'un certain nombre de différentes combinaisons possibles des charges indiquées ci-dessus, s'étendant depuis les conditions dites "normales" (U) jusqu'à celles dites "exceptionnelles" (H). La combinaison la mieux adaptée ne peut être déterminée a priori car chaque barrage (et chaque site) est un cas spécifique. Le jugement et l'expérience peuvent jouer un grand rôle dans le choix définitif de la combinaison de charges à étudier. Cependant, le Comité considère que les combinaisons de charges de très faible probabilité (par exemple, séisme exceptionnel + crue) sont excessives.

5.2.2 Matériaux

Matériaux de construction

Le choix des matériaux de construction, dans chaque cas, repose habituellement sur des bases économiques, même si certaines contraintes techniques ou de comportement peuvent influencer ce choix.

Il y a peu à dire au sujet des matériaux pour béton car la technologie est bien connue, malgré certains progrès qui se développent encore en matière de produits de substitution au ciment, d'adjuvants et de compactage du béton au rouleau. Les caractéristiques correspondant aux critères de projet sont basées sur les essais utilisant les matériaux actuels proposés pour l'ouvrage et sur le niveau du contrôle de qualité que l'on peut espérer pendant le chantier.

Le choix des caractéristiques des matériaux, correspondant aux critères de projet adoptés pour un barrage en remblai, est également basé sur des essais qui sont représentatifs du matériau mis en place; on doit également tenir compte des modifications à prévoir pendant le chantier et à long terme, après la mise en service. Le choix de caractéristiques spécifiques sera influencé par l'importance et la nature du programme de reconnaissances, de prélèvements et d'essais, et par l'importance du contrôle de qualité prévu pendant la construction.

La caractéristique la plus évidente, généralement prise en compte, est la "résistance mécanique" du matériau; souvent, ce paramètre est considéré séparément des autres caractéristiques définissant la déformabilité. Il faut noter que cela n'est justifié que si le comportement du matériau est du type plastique (ou ductile), dans lequel les contraintes présentent un palier indépendant de la grandeur des déformations pour une

* Bulletin CIGB 52 - Méthodes de calcul sismiques pour barrages - Etat de la question.

In another report* of this Committee it has been shown how such earthquakes may affect the structure and foundations via the development of excessive pore pressures and the nonlinear analysis is the most rational means of providing a reliable prediction of their effects.

For deterministic analysis of earthquake effects it is generally necessary to specify the full history of the earthquake (rather than its special characteristics). As both DBE and MCE are only stochastically known it may be necessary to design for several possible events and further research is much needed for the derivation of a suitable specification here.

Load combinations: The definition of loading criteria involves the selection of a range of credible combinations of the above mentioned loads between what might be termed "normal" (U) and "extreme" (H) conditions. The appropriate combination cannot be defined a priori as each dam and dam site is unique. Judgement and experience may play an important part in the final selection of loading combinations. However the Committee believes that load combinations, having a very low probability of occurrence, (e.g. maximum credible earthquake plus flooding) are unreasonable.

5.2.2 Materials

Construction materials

The choice of construction materials in each particular case is usually based on economic considerations although specific technical or performance requirements may influence the choice.

There is little to say about concrete materials as the technology is well established, although developments are still in progress on cement replacement, additives and roller compaction. Properties for design criteria should be based on tests using the actual ingredients proposed for the structure and on the level of quality control which can be anticipated during construction.

The choice of properties of materials as design criteria for embankment dams should also be based on tests which are representative of the "as placed" material and include the transformations which may be expected through the construction period and long term operation. The selection of specific properties should be influenced by the extent and nature of the exploration programme and the sampling and testing and the degree of quality control which is expected to be exercised during construction.

The most obvious material property generally considered is the "strength" and often this is treated in isolation from other properties describing the deformation characteristics. It is important to point out that this is only permissible if the behaviour of the material is of a plastic (or ductile) kind where the stresses maintain a plateau which is independent of strain magnitude for a considerable range of strains. This may well be a reasonable assumption for soils under certain conditions but

* ICOLD Bulletin 52 - Earthquake Analysis Procedures for Dams - State of the Art (1986)

grande plage de celles-ci. Cette hypothèse est peut-être valable pour les sols, dans certaines conditions, mais elle ne l'est pas pour des matériaux présentant un phénomène d'écrouissage négatif (comme certains sols dont la résistance au cisaillement tombe à une valeur résiduelle après déformation importante, ou le béton en traction lorsque la zone d'écrouissage négatif est si petite que l'on peut parler d'un matériau à rupture fragile). C'est pour cette raison, associée à l'expérience sur la fissuration d'origine thermique, qu'il est devenu traditionnel de négliger la résistance à la traction du béton dans la plupart des calculs. Cependant, il n'est pas rare que des projeteurs attribuent parfois au béton des valeurs élevées de résistance à la traction, en particulier dans le cas de chargement rapide lors d'un séisme. Le Comité considère qu'une telle pratique doit être utilisée avec précaution, au moins jusqu'à ce que l'expérience et des études supplémentaires sur le comportement du béton de masse soumis à des contraintes de traction et sur la représentation de ce comportement au moyen de modèles mathématiques affinés fournissent les éléments de base pour la définition de critères rationnels concernant le domaine des tensions.

Matériaux de fondation

La définition des caractéristiques pour l'étude de stabilité et du comportement des matériaux de fondation peut être le problème le plus difficile; elle correspond certainement à la tâche la plus délicate pour le bon choix des critères. Elle peut s'appuyer sur l'observation visuelle des forages de grand diamètre, des puits, des tranchées ou des galeries excavés dans la zone de la fondation, sur les essais in situ des roches et des sols, sur les essais en laboratoire effectués sur des prélèvements intacts, et sur l'examen et l'interprétation des structures géologiques révélées par les carottes et les fouilles. Le choix des critères relatifs aux fouilles, à la préparation et au traitement de la fondation, ainsi qu'aux caractéristiques et au comportement des matériaux, avec ou sans traitement, sur lesquels repose le barrage, devient une affaire d'interprétation spécialisée des données et de jugement basé sur l'expérience.

Les calculs font intervenir différentes caractéristiques des matériaux pour répondre à la fois aux conditions normales (U) et exceptionnelles (H). Les principales caractéristiques relatives à la fois à l'ouvrage et à la fondation sont:

- la résistance du matériau, c'est-à-dire les combinaisons de contraintes maximales qu'il est capable de supporter en permanence, ou pendant la durée d'un incident exceptionnel donné,
- les propriétés relatives à la loi contrainte-déformation et au temps,
- les paramètres définissant la compaction du sol et, ainsi, son risque de liquéfaction,
- la perméabilité du matériau, y compris les variations éventuelles pendant les variations de contraintes,
- les coefficients de dilatation thermique.

Chacun de ces paramètres doit être affecté d'un important coefficient d'incertitude pour tenir compte de détériorations chimiques possibles, ou autres détériorations dans le temps, ou d'une exécution défectueuse pour

is not a valid assumption for strain softening materials - such as some soils in which the shearing strength is reduced to residual values under high strain, or concrete subject to tension where the strain softening range is so small that the material can be described as "brittle". It is indeed for this reason, coupled with experience on thermal cracking, that it has become a time honoured practice to neglect the tensile strength of concrete in many analyses. However, it is not uncommon for designers, on occasion, to assign quite substantial tensile strength values to concrete especially when considering rapid earthquake loading. It is the view of the Committee that such a practice should be used with caution at least until such time as experience and further research into the behaviour of mass concrete subjected to tensile stress and the modelling of that behaviour in more refined methods of analysis provide the basis for the definition of rational criteria for tensile stressing.

Foundation materials - General

The definition of the properties for structural analyses and performance of the foundation materials may be the most difficult and is certainly the most critical activity in the selection of criteria. This may be assisted by visual inspection in large bore holes, shafts, trenches and adits excavated in the foundation area, by in situ testing of rock and soils, by testing in the laboratory of "undisturbed" samples, and by the examination and interpretation of geological structures revealed in drill cores, and excavations. The choice of criteria related to foundation excavation, preparation and treatment and to the properties and performance of the materials, treated or not, upon which the dam is to be founded becomes a matter of expert interpretation of the factual data and judgement based on experience.

Various properties of material will enter into the computations required to satisfy both Normal (U) and Exceptional (H) design criteria. The main ones which apply to both the structure and foundations are:

- the strength of the material i.e. the maximum stress combinations it can sustain permanently or for the duration of the hazard event in question,
- the constitutive properties relating stress-strain and time,
- the parameters describing the densification of "the soil" and hence its potential for liquefaction,
- the permeability of the material including variations which may occur during stress changes,
- the thermal expansion coefficients.

To all of these, substantial uncertainty coefficients must be applied to account for possible chemical or other deterioration of the material with time, faulty workmanship, if man-made materials such as concrete are concerned, or uncertainty of the natural conditions in the foundation.

les matériaux artificiels (tels que le béton), ou d'une incertitude sur les conditions naturelles de la fondation.

Terres (barrage ou fondation) et enrochements

En toute rigueur, la résistance et les propriétés rhéologiques doivent être toujours exprimées en termes de contraintes effectives, l'influence des pressions interstitielles étant traitée séparément.

Si la résistance est donnée en termes de cohésion et d'angle de frottement interne, la première doit être traitée avec prudence et éventuellement être négligée pour le cas des conditions exceptionnelles (H), et pour celui des conditions normales (U) sa valeur doit être faible pour laisser une marge de sécurité.

Pour les matériaux de remblai produits et mis en place sous contrôle, on peut déterminer, avec une bonne précision, l'angle de frottement interne (ou plutôt sa tangente, $\text{tg } \phi$). Un coefficient d'incertitude variant de 1,5 à 2,5 est acceptable, pour les conditions (U) et (H). Pour les matériaux de fondation, il est nécessaire d'être plus prudent, à moins que de bons essais in situ soient effectués.

Les lois rhéologiques de comportement sont décrites par divers "modèles" qui sont en cours d'amélioration progressive. Ici, des valeurs "extrêmes" des différents paramètres que l'ingénieur considère possibles sont utilisées dans les calculs.

Pour certains barrages en enrochement bien drainés, on suppose souvent que la sécurité est très bonne lorsque les talus sont proches de l'angle naturel au repos qui, comme on le sait, est donné par le coefficient de frottement ($\text{tg } \phi$). Cependant, ici aussi, il faut tenir compte de détériorations possibles et laisser une marge suffisante sur cette grandeur, même si des calculs élaborés ne sont pas nécessaires.

Rocher, faiblesses du rocher, contact rocher-béton

Ici aussi, la résistance est mieux définie en termes de contraintes effectives, ce qui peut faire intervenir à la fois la cohésion et le frottement interne. On propose des coefficients d'incertitude similaires à ceux préconisés pour les terres, et il faut être prudent si l'on compte sur la cohésion. Les calculs prennent en considération tous les plans de faiblesse (connus ou raisonnablement possibles), quelle que soit la méthode adoptée (état-limite, déformations). Les surfaces de contact présentent le même genre de caractéristiques que les diaclases et sont traitées de la même façon.

Le calcul de l'état-limite d'un massif de fondation avec diaclases ressemble, dans son principe, aux calculs du coefficient de glissement actuellement utilisés; en effet, il traite simplement d'un mécanisme particulier.

Pour les raisons exposées ci-dessus, la résistance à la traction du rocher est supposée être inexistante, même si le rocher est compact.

Béton

Habituellement, les caractéristiques de résistance du béton sont définies en termes de contraintes uniaxiales de compression et de traction

Soil (in dam or its foundation) and Rock Fill

From a rational point of view, the strength and constitutive properties should always be expressed in terms of the effective stresses and pore pressure effects accounted for independently.

If the strength is given in terms of cohesion and angle of internal friction the former should be treated with caution and perhaps be disregarded when exceptional (H) conditions are taken into account and conservatively low values taken under normal (U) conditions.

The angle of internal friction (or rather its tangent, $\tan \phi$), can be determined with some precision for any embankment materials which are produced and placed under controlled conditions. Uncertainty factors ranging from 1,5 to 2,5 are reasonable for both (U) and (H) conditions. A more conservative approach may be required for foundation materials unless reliable "in situ" testing is undertaken.

The constitutive relations can be and are described by a variety of "models" which are undergoing progressive improvement. Here "extreme" values of the various parameters which the designer considers possible should be used for analysis.

In some well drained rockfill dams the assertion of extreme safety is often made with slopes near the natural angle of repose which, as is well known, is governed by the friction coefficient ($\tan \phi$). However, here also possible deterioration should not be ignored and a suitable margin on this quantity applied even though elaborate computation may not be necessary.

Rock, Rock weakness and Rock/Concrete interfaces

In this, also, the strength is best defined in terms of effective stresses and both cohesion and internal friction may be involved. Similar uncertainty factors to those recommended for soil are proposed and reliance on cohesion should be made only with caution. All known or reasonably credible planes of weakness should be taken into account in analyses of both the limit and deformation type. Interface surfaces possess characteristics similar to joints and should be so treated.

A limit analysis of a jointed foundation is similar, in essence, to sliding factor calculations currently used and indeed is simply a particular mechanism considered.

For reasons already mentioned, tensile rock strength should be considered as non-existent even though the rock may be classified as massive.

(ces dernières correspondant à environ 1/10e des premières). La résistance à la compression avec étreinte est donnée comme pour les autres matériaux tels que les terres (c'est-à-dire, par une variante de l'enveloppe de Mohr-Coulomb) et une valeur de la cohésion est généralement supposée. Cependant, celle-ci tombe à une valeur faible en cas de tractions.

Il est intéressant de noter que la résistance à la compression du béton, réellement mobilisée dans l'étude d'un barrage, n'est qu'une petite fraction de la résistance totale. Cependant, les compressions maximales sont généralement localisées près des parements des barrages en béton, zone où la fissuration d'origine thermique est possible. Ainsi, cette habitude est valable et l'on préconise un coefficient d'incertitude de l'ordre de 2,5 à 4 pour la résistance à la compression.

Dans les calculs du type élastique, on suppose souvent une certaine résistance à la traction. Le Comité pense que cette hypothèse, si elle est faite à la légère, peut être dangereuse et qu'au moins pour les conditions extrêmes (H) les calculs doivent comprendre des situations statiques et dynamiques où la résistance à la traction n'est pas prise en compte. (Ceci implique un coefficient partiel infini).

Les effets des charges dynamiques sur les caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques à la fois de résistance et de déformation des matériaux sont influencées par une mise en charge rapide - la résistance présentant généralement une augmentation. Cependant, les données expérimentales disponibles concernant cette modification des caractéristiques ne sont pas complètes et certains suggèrent que, pour l'instant du moins, on recommande l'adoption des valeurs du domaine statique, plus pessimistes. De toute façon, les déformations et les déplacements lors d'un séisme sont en général limités non par une augmentation des caractéristiques de résistance, mais par la faible durée d'application des charges.

Par contre, pour les sols, la caractéristique primordiale concerne l'augmentation de leur densité sous l'action d'un chargement alternatif cyclique et, si le drainage est limité, il en résulte **toujours une augmentation des pressions interstitielles**. Dans les cas extrêmes, on assiste à la liquéfaction totale ou partielle du sol. Etant donné que ces pressions excédentaires subsistent pendant un certain temps après le passage du séisme, elles peuvent conduire à la rupture ultérieure, en conditions essentiellement statiques et, ainsi, il convient de ne pas majorer les paramètres de résistance effective du sol.

Les paramètres définissant les caractéristiques de liquéfaction (ou de compaction) sont introduits par divers moyens dans les calculs. Il suffit de dire que ces paramètres doivent être choisis de façon **prudente**.

De plus, la montée des pressions interstitielles sous l'action des charges dynamiques dépend de la perméabilité du matériau (qui varie pendant le compactage) et de la longueur du chemin conduisant à une zone de pression plus faible. Ainsi, dans les calculs, il faut réduire les perméabilités pour rester prudent. Cependant, l'hypothèse de conditions non drainées est déjà prudente dans la plupart des cas.

Concrete

Concrete strength properties are usually defined in terms of compressive and tensile uniaxial stresses (with the latter usually about 1/10th of the former). The compressive strength under confined stresses is given in terms similar to other soil-like materials (i.e. by a variant of the Mohr-Coulomb envelope) and a finite value of cohesion is generally assumed. This, however reduces to a small value when tensile strains or stresses are considered.

It is interesting to note that the compressive strength of concrete actually used in dam design is a small fraction of that which can actually be developed. However, the maximum compressive stresses usually develop near the faces of concrete dams where thermal cracking could have occurred. Hence the practice is sound and an uncertainty factor for compressive strength of the order of 2,5 - 4 is recommended.

In elastic type computations tensile strength is frequently assumed to exist. The Committee believes that such an assumption, if made lightly, may be dangerous and that at least analyses for extreme (H) conditions should involve static and dynamic situations in which tensile strength is discounted. (This implies a partial coefficient of infinity).

The effects of dynamic loading on materials properties

Both the strength and deformation properties of materials are affected by high rates of loading - the strength generally showing an increase. However, the available experimental evidence for the change of such properties is not extensive and there is a body of opinion which suggests that, at least for the time being, the conservative approach of using static values is appropriate. In any case the deformation and movement under earthquake loads will be generally limited not by strength increase but by short duration of the load.

For soils however, the important property is the tendency to densify under alternating loads and, with limited drainage, this **always leads to an increase of pore pressure**. In extreme cases this may result in total or partial liquefaction of the soil. As such excess pressures persist for some time after the passage of an earthquake shock they can lead to what is essentially post earthquake static failure and hence the effective soil strength parameters should not be increased.

The parameters defining liquefaction (or densification) properties may be introduced by various means into computations and it is sufficient to state that these should be **conservatively** chosen.

Again, the development of pore pressures under dynamic loading is dependent on the permeability of the material (which undergoes change during densification) and the length of path to an area of reduced pressure. Hence the permeability should be conservatively reduced for analysis. Undrained behaviour assumptions however, are already conservative for most cases.

6. MÉTHODES DE CALCUL INFLUENCE DES CRITÈRES RETENUS

6.1 GENERALITES

Chaque méthode de calcul de stabilité utilisée pour les études des barrages fait intervenir un certain nombre de paramètres relatifs au comportement de l'ouvrage et de sa fondation sous l'action des charges appliquées, en tenant compte, éventuellement, de l'influence du temps.

Dans le Chapitre 2, il est indiqué que, si la méthode adoptée permet l'évaluation du comportement complet du barrage et de sa fondation, les hypothèses peuvent être définies indépendamment de cette méthode. Cependant, certaines méthodes traditionnelles, qui se sont avérées valables pour le calcul des barrages en béton et des barrages en remblai et qui sont toujours utilisées couramment par beaucoup d'ingénieurs, ne reproduisent pas l'ensemble du comportement de l'ouvrage et certains critères de stabilité sont définis en fonction des hypothèses de base spécifiques à la méthode. Par ailleurs, on dit souvent que la validité d'un projet dépend beaucoup des déplacements donnés par les calculs, bien que certaines méthodes de calcul statique, couramment adoptées, ne s'intéressent qu'aux contraintes. Dans ce cas, les déplacements sont déduits des niveaux de contraintes calculées; cette démarche peut être tout à fait acceptable, malgré l'impossibilité de définir, de façon précise, les critères de déplacements maximaux admissibles. Pour évaluer, de façon réaliste, les déplacements des barrages de tout type sous l'action des forces dynamiques, et ceux des barrages en remblai (notamment les digues sur fondations compressibles) sous l'action des charges statiques, on doit avoir recours aux méthodes des éléments finis à comportement non linéaire.

6.2 BARRAGES EN BETON

Le calcul statique bidimensionnel, linéaire, d'un barrage-poids en béton suppose, implicitement, que la résistance au cisaillement du matériau est répartie uniformément sur le plan de glissement potentiel, et que les contraintes normales agissant sur ce plan varient linéairement depuis l'amont jusqu'à l'aval. Si le critère de stabilité repose sur l'absence de tractions, et si des coefficients partiels appropriés sont appliqués aux paramètres de résistance de la fondation, alors il n'y aura aucun risque de glissement de l'ouvrage ou de sa fondation.

6. METHODS OF ANALYSIS IN RELATION TO ACCEPTANCE CRITERIA

6.1 GENERAL

Each method of structural analysis, which may be used for design purposes, involves the use of a certain number of parameters with respect to the performance of the structure and its foundations under the applied loads with allowance for time effects, if appropriate.

In section 2, it has been indicated that, provided the method of analysis assesses the complete behaviour of the dam and its foundations, the specification of criteria can essentially be divorced from the method. However, some traditional methods of analysis of both concrete and embankment dams, which have been used with success in the past and which remain in current use by many designers, do not represent complete behaviour and some criteria are related to assumptions inherent in the method. It is also argued that displacements should play a significant role in the acceptability of design and this in the knowledge that some currently accepted methods of static analysis deal only with stresses. In such cases displacements can only be inferred from calculated stress levels and this may be entirely adequate even though criteria for acceptable displacements cannot be defined absolutely. Displacements of all types of dam under dynamic loading and of embankment dams (particularly those founded on compressible foundations) under static loading can only be realistically assessed using non-linear finite element methods.

6.2 CONCRETE DAMS

A simple two dimensional linear static analysis of a concrete gravity structure is based, intrinsically, on the assumption that the shear resistance is uniformly distributed across the potential sliding surface and that the normal stresses on that surface vary linearly from upstream to downstream. If the acceptance criterion is that tension should not occur and if appropriate partial coefficients are used for the foundation strength parameters there can be no risk producing displacements of the structure or its foundations.

Mais le calcul du même ouvrage par la méthode des éléments finis, dans le domaine statique, linéaire, permet éventuellement l'adoption de variations de la résistance au cisaillement le long du plan de glissement; dans les résultats, on constate des concentrations importantes de contraintes aux pieds amont (tractions) et aval (compressions). Par conséquent, avec l'adoption du critère "no tension", le calcul par éléments finis conduit à un projet présentant une plus grande marge de sécurité, même si la résistance au cisaillement est constante sur le plan de rupture potentielle. On a démontré que, même si l'on accepte certaines tractions (moyennant un coefficient partiel approprié, le calcul par éléments finis conduit à un projet plus "prudent" qu'un simple calcul statique bidimensionnel, linéaire. Autrement dit, pour des critères de base identiques, les deux méthodes conduisent à deux projets différents.

Dans le cas des calculs dynamiques, on sait depuis longtemps que les coefficients sismiques traditionnellement introduits dans les calculs simples, en pseudo-statique linéaire, sont bien en-deçà des accélérations susceptibles de se manifester dans l'ouvrage pendant un séisme moyen ou important, du type adopté éventuellement dans les "scénarios d'utilisation". Ceci, ainsi que la surestimation des secousses sismiques appliquées et la prudence relative de la méthode des éléments finis mentionnée ci-dessus à propos du calcul statique linéaire, signifient qu'un barrage-poids en béton calculé simplement en pseudo-statique linéaire, avec le critère "no tension", présentera manifestement des tractions importantes lorsqu'il sera étudié par des méthodes plus perfectionnées. Afin d'éviter des projets "trop prudents" pour ces ouvrages, on adopte souvent un calcul dynamique linéaire par éléments finis, en tolérant des tractions transitoires dont la valeur peut atteindre 12,5 % de la résistance à la compression du béton, sans tenir compte du phénomène de concentration des tractions au pied amont. Pour défendre cette approche, on fait valoir que, d'après certaines observations, la résistance en traction transitoire est plus élevée que la résistance statique, et que la relation contraintes-déformations n'est plus linéaire au voisinage de la rupture. Dans cette approche, le critère de justification, en ce qui concerne les déplacements, est normalement l'absence de fissuration dans le "scénario d'utilisation".

Pour l'étude du comportement sismique dans le "scénario de risque", lorsque le critère de déplacement appliqué est "l'absence de perte de la retenue", on peut tolérer une certaine fissuration du béton mais, dans ce cas, seules les méthodes dynamiques, non linéaires, sont valables.

On adopte souvent le critère que l'ouvrage et sa fondation doivent rester "assez sûrs" dans les conditions statiques après un séisme.

However, an analysis of the same structure using linear static finite element method will permit the adoption (if appropriate) of variations in shear strength along the potential sliding surface and will demonstrate significant stress concentrations at the heel (tension) and at the toe (compression). As a consequence, with the adoption of the "no tension" criterion, the finite element method will lead to a more conservative design even if the shear strength is uniform on the plane of potential failure. It has been demonstrated that even with the acceptance of some tension (using an appropriate partial coefficient) the finite element method will produce a more conservative design than the simple two dimensional linear static analysis. In other words, for the same basic criteria the two methods result in a difference in design.

For dynamic analysis it has long been recognized that the typical seismic coefficients used for simple pseudo-static linear analysis are much less than the accelerations which may be developed in the dam structure during moderate to severe earthquakes such as may be adopted in "utilisation scenarios". This situation, coupled with the tendency to overestimate the earthquake motions to be applied and the relative conservatism of the finite element method referred to above for static linear analysis, means that a concrete gravity dam designed by the simple pseudo-static linear method with "no tension" criteria will almost certainly be shown to have significant tensile stresses when evaluated by more modern methods. In order to avoid "excessively conservative" designs for such structures many designers, using the dynamic linear finite element method, allow transient tensile stresses of as much as 12,5 % of the concrete cylinder compressive strength after ignoring the tensile stress concentration effect at the heel. Arguments used in support of this approach are based on some evidence that transient tensile strength exceeds the static value and that the stress-strain relationship becomes non linear as failure is approached. In such design procedures the acceptance criterion, in so far as displacements are concerned, is usually that cracking does not occur for the "utilisation scenario".

When performance for the earthquake "hazard scenario" is analysed, and the displacement criterion of "non loss of reservoir" is applied then cracking of the concrete may be tolerated, but in this case only dynamic non-linear methods of analysis are appropriate.

A commonly accepted criterion for acceptance is that the structure and its foundations maintain an "appropriate" degree of safety under static post earthquake conditions.

Pour les barrages-voûtes en béton, le calcul tridimensionnel est le seul valable et l'essentiel de ce qui précède, relatif aux critères de contrainte et de déplacement dans les "scénarios d'utilisation" en statique et en dynamique, reste valable. Les calculs par éléments finis, en linéaire, avec couplage de la retenue et de la fondation, sont couramment acceptés et l'on peut penser que ces méthodes donnent une évaluation assez fidèle des contraintes en élasticité linéaire, pour les efforts statiques et dynamiques, étant entendu que l'on ne doit pas ignorer les déformations non linéaires éventuelles de la fondation. En ce qui concerne les calculs relatifs aux séismes exceptionnels, pour lesquels la fissuration peut être tolérée, le calcul non linéaire est la seule approche valable; mais subsiste la question essentielle de la définition du niveau de détérioration jugé acceptable sans rupture totale (perte partielle de la retenue).

6.3 BARRAGES EN REMBLAI

Les méthodes de calculs bidimensionnels couramment utilisées (charge limite - ou "rupture" - en statique et en pseudo-statique), avec adoption de paramètres et de coefficients partiels appropriés, ne fournissent pas de précisions sur les déplacements de l'ouvrage ou de ses fondations, ni sur la répartition des contraintes. Ces calculs, même lorsqu'ils sont associés à un calcul simple, exécuté indépendamment et destiné à évaluer les tassements de l'ouvrage et de sa fondation, ne donnent pas d'indication réaliste sur le comportement de l'ensemble en termes de déplacements. On sait maintenant que les déplacements apparaissant au sein de l'ouvrage et de sa fondation, et le régime des contraintes correspondant, peuvent provoquer la fissuration de l'organe d'étanchéité ou faire naître les conditions propices à la fracturation hydraulique. Ainsi, un ouvrage jugé sûr après un tel calcul peut s'avérer "dangereux" lorsqu'il est calculé en termes de déplacements. De plus, la répartition des déplacements est parfois influencée par la nature tridimensionnelle de la zone de la fondation et par la répartition des matériaux dans celle-ci.

Pour cette raison, le Comité a préconisé que la justification du projet devait reposer, en dernier lieu, sur les critères relatifs principalement aux déplacements. Le calcul tridimensionnel, non linéaire, par la méthode des éléments finis est le seul moyen d'évaluer les déplacements à l'intérieur de l'ouvrage et de sa fondation. Cependant, sauf dans le cas où la fissuration par traction est évidente, le projeteur doit s'appuyer sur l'interprétation des contraintes pour estimer le risque de fracturation hydraulique ou d'autres conditions identiques "dangereuses". De plus, les méthodes de calcul par éléments finis, qui sont couramment utilisées du fait qu'elles sont facilement disponibles pour un coût raisonnable, ne permettent pas d'évaluer la sécurité vis-à-vis d'une rupture en masse sur des surfaces internes où les niveaux de contraintes dépassent la résistance des matériaux.

Dans le cas de charges sismiques, la méthode aux éléments finis, dans le domaine dynamique non linéaire, est le seul moyen d'évaluer le comportement en déplacement, incluant le développement de pressions interstitielles excessives conduisant à une rupture en masse. Souvent, on utilise un calcul dynamique pour évaluer les pressions interstitielles, ces valeurs étant par la suite introduites dans un calcul statique d'état-limite. Dans ces calculs, les critères de déplacement sont souvent les suivants:

For concrete arch dams only three dimensional methods of analysis are appropriate and most of the preceding discussion on stress and displacement criteria for static and dynamic "utilisation scenarios" is applicable. Linear finite element procedures, including allowance for reservoir and foundation interaction, are commonly accepted and can be expected to give reasonably reliable estimates of linear elastic stresses for both static and dynamic stresses with the proviso however, that possible non linear deformation of foundations is not ignored. When it comes to extreme earthquake analysis, for which cracking may be accepted, the non linear analysis is the only accepted design procedure, but there remains the important question as to what constitutes an acceptable degree of damage when complete failure (some loss of reservoir) is not involved.

6.3 EMBANKMENT DAMS

Commonly used two dimensional static and pseudo static limit load (or "collapse") methods of analysis, using appropriate parameters and partial coefficients, do not give the designer any information on displacements of the structure or its foundations nor on the distribution of stresses. Such analyses, even combined with independent simple methods of evaluation of settlement within the structure and the foundation do not provide the designer with a realistic indication of the performance of the complex in terms of displacements. It is now recognised that displacements within the structure and foundations together with the distributions of stresses associated therewith can induce cracking of the water-retaining barrier or conditions conducive to hydraulic fracture. Hence a structure which may be considered to have an acceptable level of safety when analysed using such methods may, in fact, prove to be "unsafe" when examined with respect to displacements. Further, the pattern of displacements may well be influenced by the three dimensional configuration and the distribution of materials within the foundation area.

It is for this reason that the Committee has recommended that the ultimate acceptability of a design should be based on criteria related mainly to displacements. Non-linear three dimensional finite element methods of analysis present the only means by which a reasonable evaluation of displacements within the structure and its foundations can be made. However, except in the case of clear evidence of tensile cracking, the designer must rely on the interpretation of stresses to identify the potential for hydraulic fracture or other similar "unsafe conditions". Further, finite element methods of analysis, which are currently in use because they are readily available to the designer at reasonable cost, do not provide a means of evaluating security against massive collapse along internal surfaces upon which stress levels exceed the strength of the materials.

When seismic loadings are concerned the non-linear dynamic finite element method is the only means by which the designer can evaluate the displacement performance including the development of excessive pore pressures leading to massive collapse. A commonly accepted practice is to establish pore pressures by the dynamic method and to apply those pressures in a static limit load analysis. For such analyses, commonly accepted displacement criteria are that:

- a) pour les "scénarios d'utilisation"

La digue en remblai et sa fondation, y compris les organes d'étanchéité, doivent rester intacts et continuer de fonctionner normalement; la perte éventuelle de revanche doit être très faible.

- b) pour les "scénarios de risque"

La digue et sa fondation, y compris les organes d'étanchéité et la revanche, pour les conditions statiques après le séisme, doivent être capables de maintenir la retenue jusqu'à ce que des mesures correctives puissent être prises.

6.4 METHODE DE CALCUL ET PRECISION DES RESULTATS

En général, plus la méthode de calcul est perfectionnée, plus les paramètres de comportement à y introduire sont multiples, précis et élaborés. Cependant, il ne faut pas confondre la précision des résultats d'un calcul avec la complexité et le perfectionnement de la méthode. En d'autres termes, la méthode ne peut fournir des résultats plus corrects que les paramètres utilisés.

a) for "utilisation scenarios":

the embankment and foundations including the water retaining and seepage control elements should remain intact and continue to function normally and loss of freeboard if any should be minor.

b) for "hazard scenarios":

the structure and foundations including seepage control elements and freeboard should, for static post-earthquake conditions, be capable of retaining the reservoir until corrective measures can be taken.

6.4 METHOD OF ANALYSIS AND PRECISION OF RESULTS

In general, the more sophisticated is the method of analysis the more copious, detailed and refined are the performance parameters required for the analysis. However, the precision of the results of an analysis should never be confused with the complexity and sophistication of the method. In other words the method itself does not produce results which are more correct than are the parameters which have been used.

7. CRITÈRES AUTRES QUE CEUX RELATIFS AU CALCUL DE STABILITÉ

7.1 SURFACES DE CONTACT

Les dimensions et la configuration des surfaces de contact entre la structure du barrage et la fondation ou les ouvrages annexes sont parfois critiques pour la sécurité du barrage. En effet, plusieurs catastrophes ont été attribuées à des faiblesses de ces surfaces de contact. Des calculs perfectionnés comme ceux signalés dans le précédent chapitre ne permettront pas de localiser ces zones critiques si l'on n'en tient pas compte lors de l'élaboration du modèle de calcul.

Les arêtes ou les décrochements dans la surface de fondation peuvent provoquer des zones de fortes concentrations de contraintes, peu souhaitables pour un barrage en béton ou un masque en béton. Ils peuvent être le siège de tassements différentiels ou de reports de charges par effet de voûte dans le cas des barrages en remblai, avec décollement du contact ou zones locales de moindres contraintes pouvant conduire à l'érosion interne ou à la fracturation hydraulique. Bien que l'on exige une forme de surface de contact de fondation, qui permette d'éviter ces problèmes, les conditions géologiques peuvent être telles qu'il est impossible d'éviter des configurations défectueuses pendant la construction sans coût excessif et délai. Dans ces conditions, il convient d'établir des critères et de les introduire dans les documents contractuels (spécifications techniques et plans, en vue de permettre d'apporter des traitements correctifs, si nécessaire, pendant le chantier.

Les critères pour le traitement des surfaces de contact de fondation portent notamment sur l'application de matériaux d'étanchéité ou de filtres pour éliminer le risque d'érosion interne du remblai ou de la fondation.

En ce qui concerne les surfaces de contact entre le remblai et les ouvrages annexes, les critères relatifs au dimensionnement et à la configuration de la surface de contact, ainsi qu'au choix des matériaux et des méthodes de mise en place du remblai au contact, doivent conduire à un contact effectif et permanent de la zone imperméable, et à la mise en place de protections spéciales contre les érosions internes en cas de décollement, de fissuration ou de fracturation hydraulique.

7.2 DETAILS DE PROJET

Même si un projet de barrage répond aux critères généraux de stabilité, son comportement et sa sécurité dépendent souvent de l'attention apportée aux détails critiques du projet. Ces détails doivent refléter la philosophie des critères de base relatifs à la tenue à long terme de l'ouvrage, incluant le bon fonctionnement et la pérennité des organes essentiels à sa sécurité (par exemple, drainage, ...). Si possible, ces dispositions seront simples et pratiques pour permettre la construction, la surveillance et l'entretien sans demander un effort considérable.

7. CRITERIA OTHER THAN THOSE RELATED TO STRUCTURAL ANALYSIS

7.1 INTERFACES

The sizes and configurations of interface between the dam structure and the foundation or appurtenant structures may be critical to the security of the dam and, in fact, several disasters have been attributed to weaknesses associated with such interfaces. Sophisticated analyses, such as those referred to in the previous chapter, will not identify such critical zones if they are ignored in setting up the model for analysis.

Sharp corners or steps in the foundation surface may cause undesirable stress concentrations in the case of concrete dams and concrete membranes. They may provoke differential settlements or arching in zoned embankment dams leading to separations at the interface or to local areas of reduced stress which may be conducive to internal erosion or hydraulic fracture. While the structurally desirable form of foundation contact surfaces may be prescribed, with the intention of avoiding these potential problems, the geological conditions may be such that unsatisfactory configurations cannot be avoided during construction without excessive cost and delay. Under these conditions, criteria should be established and presented in specifications and drawings to permit appropriate corrective treatment to be taken if necessary during construction.

Criteria for treatment of foundation interfaces may also include the application of sealing or filter materials to eliminate risk of internal erosion of embankment or foundation materials.

Insofar as interfaces between dam embankments and appurtenant structures are concerned, the criteria governing the dimensioning and configuration of the contact surfaces and the choice of embankment materials and placement methods at the interfaces should be such as to ensure a permanent positive contact of the impermeable zones and the provision of special protection against internal erosion should separation, cracking or hydraulic fracture occur.

7.2 DESIGN DETAILS

Even though a dam design may meet the general structural acceptance criteria, its performance and ultimate security may well depend on the attention given to critical details of the design. The details should reflect the philosophy of the basic criteria related to long term structural integrity including the proper functioning and permanence of systems vital to security (e.g. drainage). They should be as simple and practical as possible so that construction, inspection and maintenance can be undertaken without the need for herculean effort.

7.3 METHODES DE CONSTRUCTION

Les spécifications techniques complètent les plans en présentant au constructeur et au responsable du contrôle des travaux les exigences spécifiques relatives aux matériaux et aux techniques nécessaires pour assurer que la qualité des matériaux et les détails constructifs répondent bien aux critères de projet. Aussi, est-il essentiel que ces spécifications traduisent les exigences du projeteur de la manière la plus claire et sans ambiguïté.

Même si ces spécifications sont bien rédigées, il n'est pas toujours possible d'éviter une terminologie peu précise, ou certaines ambiguïtés. Très souvent, la qualité de la communication est améliorée si le projeteur établit un document expliquant la philosophie et le cadre général du projet, ce qui permet d'interpréter correctement le dossier des spécifications et de souligner les éléments essentiels du projet et leurs relations avec les travaux.

Enfin, pour s'assurer que les critères de projet sont compris et respectés totalement, on ne peut faire mieux que d'assurer un dialogue permanent entre l'équipe des études et l'équipe des travaux pendant toute la durée du chantier. Le projeteur doit intervenir dans l'approbation des travaux de préparation et de traitement des fouilles et dans toutes les modifications apportées en fonction des conditions réelles révélées par les travaux.

7.4 CRITERES CONCERNANT L'EXPLOITATION

Tout barrage profitera de l'établissement par le projeteur d'un manuel dans lequel sont précisées les conditions requises pour l'exploitation, la surveillance et l'entretien, qui sont implicitement dans les critères de projet ("scénarios").

7.3 CONSTRUCTION METHODS AND PROCEDURES

Specifications supplement drawings in presenting to the constructor and supervisor the specific requirements for materials and procedures which are necessary for ensuring that the quality of materials and details of the construction satisfy the design criteria. It is essential, therefore, that the specifications identify as clearly and unambiguously as possible the designer's requirements.

Even with well prepared specifications, it is not always possible to avoid the use of vague terminology and some ambiguities. The question of communication may be improved in most cases by the preparation, by the designer, of a report in which the design philosophy is explained together with background information which will permit the correct interpretation of the specifications and identify the critical elements of the design and their relation to the construction work.

Finally, in ensuring that the design criteria are understood and fully respected, there is no substitute for the continuous liaison between the design and the construction group throughout the construction period. The designer should be involved in the approval of the preparation and treatment of the foundations and in all modifications which are made to suit the actual conditions encountered in the field.

7.4 DESIGNER'S OPERATING CRITERIA

All dam projects will benefit from the preparation, by the designer, of a manual in which are identified the specific requirements for operation, inspection and maintenance which are implicit in the design criteria ("scenarios").

8. APPAREILS DE MESURE ET AUSCULTATION EN TANT QUE CRITÈRES DE PROJET

L'auscultation du barrage et de sa fondation répond à quatre objectifs importants:

- a) Indiquer l'évolution des conditions pendant les travaux pour confirmer, avant la mise en service, le bien-fondé de certains critères,
- b) Indiquer l'évolution des conditions pendant et après la mise en eau, afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage par rapport à celui prévu lors de l'élaboration des critères,
- c) Indiquer l'évolution de conditions nuisibles pendant la vie de l'ouvrage pour permettre l'exécution de travaux destinés à éviter la "dégradation" de la sécurité,
- d) Fournir des enseignements pour l'amélioration des projets futurs.

Les appareils de mesures seront mis en place le plus tôt possible avant ou pendant le chantier afin de disposer d'une série de données aussi longue que possible pour les évaluations ultérieures.

Pendant les travaux, la connaissance de l'évolution des différents paramètres: températures, contraintes, déformations, déplacements, ouvertures des joints, dans les barrages en béton, peut influencer fortement les décisions relatives au programme de construction ou aux méthodes de fabrication, de mise en place et de refroidissement des bétons, et de clavage des joints. Pour les ouvrages en remblai, l'évolution des pressions interstitielles et des déformations dans le remblai et dans la fondation peut être déterminante pour le comportement ultérieur du barrage si elle s'écarte de celle prévue.

Puisque l'une des périodes les plus critiques dans la vie de la plupart des barrages, sinon de tous les barrages, correspond à la première mise en eau et à la période suivant immédiatement celle-ci, la lecture fréquente de tous les appareils de mesures est peut-être le seul moyen d'évaluer la sécurité du barrage par rapport aux hypothèses et critères du projet. Il faut détecter les anomalies avant qu'elles deviennent dangereuses, afin de prendre les mesures nécessaires destinées à y remédier ou à les éliminer.

8. INSTRUMENTATION AND MONITORING AS ELEMENTS OF DESIGN CRITERIA

Instrumentation of the dam and its foundations serve four important purposes:

- a) To indicate the evolution of conditions during construction so that the validity of certain criteria can be confirmed before the project is commissioned,
- b) To indicate the evolution of conditions during and following first filling of the reservoir so that performance can be evaluated with respect to that assumed in the development of the criteria,
- c) To indicate the evolution of undesirable conditions throughout the life of the dam so that remedial measures may be undertaken to avoid deterioration of its security,
- d) To record experience for the improvement of the design of future dams.

The instruments should be installed at the earliest possible time before or during construction in order to have the maximum possible time base for subsequent evaluation.

During construction, the knowledge of the evolution of temperatures, stresses, strains, displacements and joint openings in concrete dams may be vital to decisions relating to the construction programme or procedures relating to concrete production, placement and cooling and joint grouting. For embankment dams, the evolution of pore pressures and deformations in the embankment and foundations may be vital to the subsequent performance of the dam if they are not consistent with the design criteria.

As one of the most critical periods during the life of most, if not all, dams is the period during and immediately following first reservoir filling, complete and frequent readings of instruments may be the only means by which the security of the dam can be evaluated with respect to the assumptions and criteria used for the design. Unforeseen conditions, which may lead to insecurity, should be identified before they become serious so that appropriate steps might be taken to correct or eliminate them.

Pendant toute la vie du barrage, un programme de lectures des appareils, avec visites et rapports périodiques sur le comportement de l'ouvrage, permet de s'assurer que les critères de sécurité du projet restent valables ou de prendre des mesures nécessaires pour remettre le barrage et sa fondation dans des conditions acceptables de sécurité.

Aussi, est-il évident que les critères de projet de tout barrage important doivent comporter des dispositions pour la mise en place d'appareils de mesures dans les zones d'intérêt particulier, et pour la lecture et l'interprétation des résultats depuis la mise en place des appareils.

A programme of instrument readings, combined with inspections and periodic evaluation reports throughout the life of the dam, will serve to confirm that the security criteria of the design remain valid or that steps should be taken to restore the dam and its foundations to acceptable levels of security.

It is clear, therefore, that the design criteria of all important dams should include provisions for the installation of instruments in areas of special concern and for the reading and interpretation of those instruments from the time of their installation.

9. LEÇONS TIRÉES DE L'EXPÉRIENCE ÉVOLUTION DES CRITÈRES ET DES MÉTHODES DE PROJET

La technologie des barrages a une longue histoire. Les très bons niveaux de sécurité des barrages, qui se reflètent dans les critères et les techniques adoptés à l'heure actuelle, ont été acquis pas à pas à partir des expériences, notamment des accidents et incidents de barrages. Dans l'évolution permanente de la technologie visant à une sécurité toujours accrue, il y a deux niveaux dans la collecte des informations tirées des faits.

La première phase se situe lors de la construction et de la mise en service de chaque barrage. Malheureusement, dans bien des cas, il y a peu ou pas de communication entre le projeteur et les responsables de la construction et de la mise en service. Les problèmes créés ou rencontrés pendant les travaux et la mise en service, qui ne sont pas identifiés ou communiqués au projeteur, ou qui ne sont pas résolus en liaison avec celui-ci, peuvent provoquer des incidents qu'il est difficile ou impossible d'expliquer ou qui peuvent se reproduire pour d'autres ouvrages du même type. Chaque barrage doit apporter des enseignements au projeteur et au constructeur pour minimiser l'influence des erreurs humaines et permettre des progrès rationnels de la technologie.

Le deuxième niveau dans les enseignements à tirer des ouvrages réalisés concerne la recherche et l'interprétation des accidents et incidents. De nombreux accidents et incidents peuvent être classés comme des "catastrophes naissantes" auxquelles il ne manque que quelques éléments petits mais critiques, ou qui ont entraîné des interventions de divers types empêchant de devenir de vraies catastrophes. Aussi, l'analyse de tels événements peut-elle revêtir la même importance que celle des catastrophes réelles dans la collecte des expériences conduisant à l'amélioration des critères et des techniques relatifs à la sécurité. Bien que les informations sur les catastrophes réelles et les "catastrophes naissantes" deviennent de plus en plus disponibles, la plupart des personnes aiment mieux faire état seulement des événements non catastrophiques.

Au moyen d'analyses systématiques des incidents et accidents, on recueille des informations sur les insuffisances des critères, des détails constructifs et des techniques, sur l'efficacité des mesures prises pour éviter l'erreur humaine, sur la tolérance des risques calculés et acceptés, et enfin, sur l'existence de phénomènes inconnus de façon objective.

L'analyse rationnelle et systématique comporte trois phases:

- a) Définition des données concernant l'incident ou l'accident,
- b) Interprétation des données et définition de la cause possible (ou des causes possibles),

9. FEEDBACK FROM EXPERIENCE THE EVOLUTION OF CRITERIA AND DESIGN METHODS

Dam engineering is a technology with a long history. The high safety level of dams which is reflected in modern design criteria and techniques has been developed incrementally from experience and especially from experience related to accidents and incidents. There are two levels of feedback which are important to the continuing evolution of the technology in the pursuit of increasing levels of safety.

The first phase of feedback should take place during the construction and commissioning of an individual dam. Unfortunately, there are many cases where there is little, if any, communication between the designer and those responsible for construction and commissioning. Problems created or encountered during construction and commissioning which are not recognized or communicated to the designer or which are not resolved with the collaboration of the designer may provoke incidents which are difficult or impossible to explain or may be repeated on subsequent similar projects. Each dam project should contribute to the learning experience of both the designer and the constructor so that the effects of human error may be minimised and the technology may progress in a rational way.

The second level of feedback of experience relates to the investigation and interpretation of accidents and incidents. Many accidents and incidents may be classified as "near disasters" which have one or more small but critical elements missing or which provoked some form of intervention which prevented them from becoming disasters. The analysis of such events can, therefore, have the same importance as disasters in the feedback of experience to improve criteria and techniques related to safety. Although information on disasters and near disasters is becoming increasingly available, most people are more willing to report on non disastrous events.

By systematic analysis of incidents and accidents, information can be gathered about deficiencies in criteria, design, details and techniques, the effectiveness of measures taken to avoid human error, the admissibility of the calculated risks involved and, finally, the existence of objectively unknown phenomena.

Rational and systematic analysis involves three distinct phases:

- a) The definition of the facts associated with the accident or incident,
- b) The interpretation of the facts and the definition of the cause or possible causes,

- c) Enseignements pour la profession en matière de risque calculé, de qualité suffisante des techniques et des critères, de stratégies pour éviter ou déceler les erreurs, d'existence de phénomènes jusqu'ici inconnus pour lesquels des programmes de recherches sont nécessaires.

Ce processus est essentiel à l'évolution des critères pour l'étude et la construction de barrages sûrs.

- c) Feedback to the profession concerning calculated risk, adequacy of techniques and criteria, strategies to avoid or detect errors, the existence of previously unrecognised or unknown phenomena and for which research projects should be undertaken.

This process is vital to the evolution of criteria for the design and construction of safe dams.

10. CRITÈRES TENANT COMPTE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le choix des paramètres de projet, comprenant les caractéristiques de la fondation et des matériaux de construction, les coefficients partiels, etc., dans chaque cas particulier, s'appuie sur l'importance et la précision des informations disponibles au moment de l'étude. La marge de sécurité prise dans les critères est fonction de l'état d'ignorance du projeteur. En fait, il semble que bien des critères publiés soient basés sur l'hypothèse qu'au moins certains paramètres essentiels ne sont pas déduits de mesures complètes et précises de toutes les conditions du site. L'adoption de coefficients de sécurité moins "pessimistes" peut être valable lorsque les paramètres résultent d'un programme complet de reconnaissances et d'essais.

Cependant, tout ingénieur expérimenté aura rencontré la situation courante dans laquelle des conditions imprévues surgissent pendant les travaux. Souvent, certaines conditions ne correspondent pas aux données utilisées ou aux hypothèses adoptées dans la détermination des critères du projet initial. Ces conditions concernent plusieurs aspects: conditions géologiques précises ou configuration de la fondation préparée; état ou qualité des matériaux de construction; résultats douteux obtenus avec les méthodes ou les installations de chantier imposées; données statistiques sur les crues; conditions météorologiques. Souvent, ces conditions nouvelles mises à jour conduisent à reconsidérer les critères du projet et le projet lui-même, en vue d'éviter des retards onéreux provoqués par la nécessité d'exécuter des travaux complémentaires importants pour assurer une conformité parfaite avec les critères initiaux.

Dans ces cas, le projeteur est parfois très sollicité pour résoudre le problème, ou les problèmes, au plus vite, en vue de permettre la poursuite des travaux sans retard. Mais, très souvent, cette situation apporte au projeteur un ensemble de conditions ou de données plus précises que celles disponibles au moment de l'étude initiale. Par exemple, la nature et l'importance de structures géologiques défavorables sont révélées, rendant ainsi possibles des essais pour préciser les paramètres de résistance réelle des surfaces de rupture potentielle, ce qui est fondamental pour la sécurité. Avec ces données précises, le projeteur sera mieux placé qu'avant pour confirmer que la sécurité du barrage n'est pas en question. Par contre, la situation peut nécessiter la modification du projet pour tenir compte d'une réévaluation des critères qui seront plus contraignants que ceux adoptés initialement.

Réciproquement, la découverte de conditions plus favorables que celles admises dans le projet initial peut justifier des modifications qui entraînent des économies.

10. CRITERIA IN RELATION TO THE STATE OF KNOWLEDGE

The selection of design parameters, including properties of foundation and construction materials, partial coefficients, etc. in any particular case should be based on the extent and reliability of information available at the time of design. The conservatism of the criteria should be a function of the state of ignorance of the designer. In fact, it seems that many published criteria are based on the assumption that some, at least, of the critical parameters are not derived from exhaustive and accurate measurement of all site conditions. The use of less conservative coefficients of security may be justified when parameters are derived from comprehensive exploration and test programmes.

Nonetheless, all experienced dam designers will have encountered the frequently occurring situation when unexpected conditions occur during construction. In many cases, particular conditions do not correspond with the data used or the assumptions made in establishing the original design criteria. Such conditions may cover many aspects including the precise geology or configuration of the prepared foundation, the condition or quality of construction materials, the questionable results of prescribed construction methods or equipment, the flood statistics and the meteorological conditions. It is not unusual for such revelations to require a reconsideration of the design criteria and the design itself in the interests of avoiding costly delays occasioned by the need to undertake extensive remedial works to conform precisely with the original criteria.

On such occasions there may be a great pressure on the designer to resolve the problem or problems in the shortest possible time so that construction may continue without delay. In many cases however, such a situation provides the designer with a more precise set of conditions or data than was available at the time of design. For example, the nature and extent of specific adverse geological structures, which are vital to safety, may be revealed and it may be possible to conduct tests to identify actual strength parameters for potential failure surfaces. With such precise information, the designer may be better equipped than at the time of the original design to confirm that the security of the dam is not in question. On the other hand the situation may require a change in design to accommodate revised criteria which are more severe than originally adopted.

Conversely, the exposure of more favourable conditions than those assumed in the original design may justify changes which result in economies.

Les lectures des appareils de mesures, effectuées pendant le chantier, peuvent également influencer les attitudes vis-à-vis des critères initiaux et de leur validité.

On pourrait citer beaucoup d'autres exemples, mais le point important à retenir est celui-ci: les critères relatifs au barrage construit doivent refléter l'interprétation exacte de toutes les données et conditions utiles.

Instrument readings available during the construction period may also influence attitudes with respect to the original criteria and their applicability.

Many more examples could be cited but the important point to be made is that the criteria relating to the dam, as constructed, must reflect the expert interpretation of all relevant data and conditions.

11. CONCLUSIONS

Ce rapport provisoire sur la philosophie du choix des critères de projet indique le chemin que les projeteurs de barrages devraient suivre afin d'obtenir des projets sûrs et performants. Le Comité a exprimé son attitude opposée à l'approche basée sur les coefficients dits "de sécurité" pour les calculs de stabilité, puisqu'ils conduisent à des déformations indéterminées ou incohérentes; ils peuvent tromper les ingénieurs expérimentés, aussi bien que les non-spécialistes, pour l'évaluation de différents projets.

La nécessité de préciser, de façon claire et logique, les attentes que l'on peut raisonnablement espérer d'un projet et les conditions qu'il faut améliorer pour parvenir à ces fins, est essentielle aujourd'hui, où sont disponibles des outils informatiques puissants, non seulement pour les calculs, mais aussi pour l'optimisation et pour la Conception Assistée par Ordinateur, facilitant l'obtention de projets optimaux. Malgré sa puissance, l'ordinateur ne réfléchit pas; il est performant seulement si les ordres qu'on lui donne sont précis. La question des critères de projet réside précisément dans l'établissement de tels ordres.

Nous avons passé sous silence certains risques considérés actuellement dans l'étude des centrales nucléaires: sabotage, impact d'avions ou de projectiles, etc. Il faut certainement en tenir compte; c'est une question à étudier plus tard, mais la résistance propre des barrages, qui sont des ouvrages massifs, permet de penser que de telles considérations sont d'ordre mineur.

11. CONCLUDING REMARKS

This preliminary report on the philosophy of choosing design criteria indicates the path which, it is believed, dam designers should follow in order to arrive at safe and efficient designs. The Committee has indicated its dissatisfaction with so-called "factors of safety" approaches to structural analysis as they lead to undefined or inconsistent deformations and may mislead not only the laymen but, indeed, qualified engineers in evaluating the merits of various designs.

The need for specifying, in a clear and logical manner, the rational expectations of a design and the conditions which have to be improved to achieve them is of particular importance today when powerful computation techniques are available not only for analysis but also with automatic optimization and Computer Assisted Design capabilities which facilitate the achievement of optimum designs. Despite its power the computer does not think and it can only perform satisfactorily if given clear instructions. It is with such instructions that the subject of design criteria is concerned.

We have not considered here some of the hazards which conventionally are taken today into account when designing nuclear power stations. Possibility of sabotage, impact of aircraft or projectiles, etc. should doubtless be considered - we leave this to the future, but here the inherent resistance of massive dam structures helps us to believe that such considerations may only be of marginal importance.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : mars 1988
N° 13703
ISSN 0534-8293
Couverture : TILT

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>