

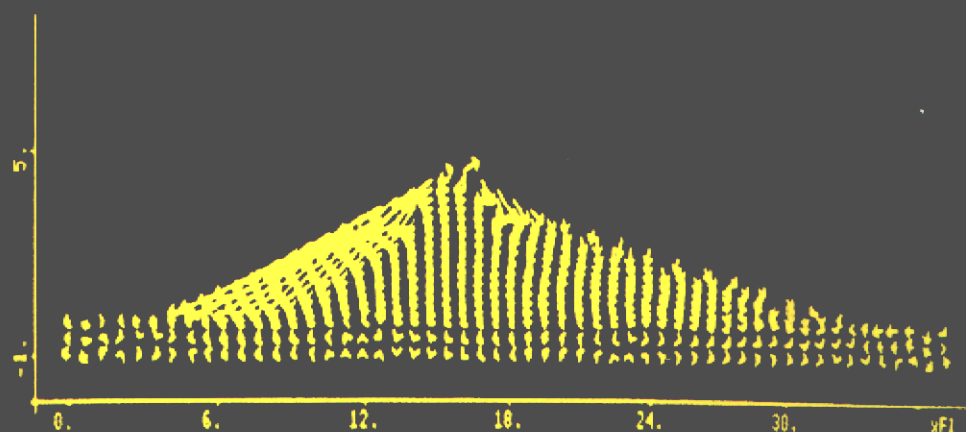
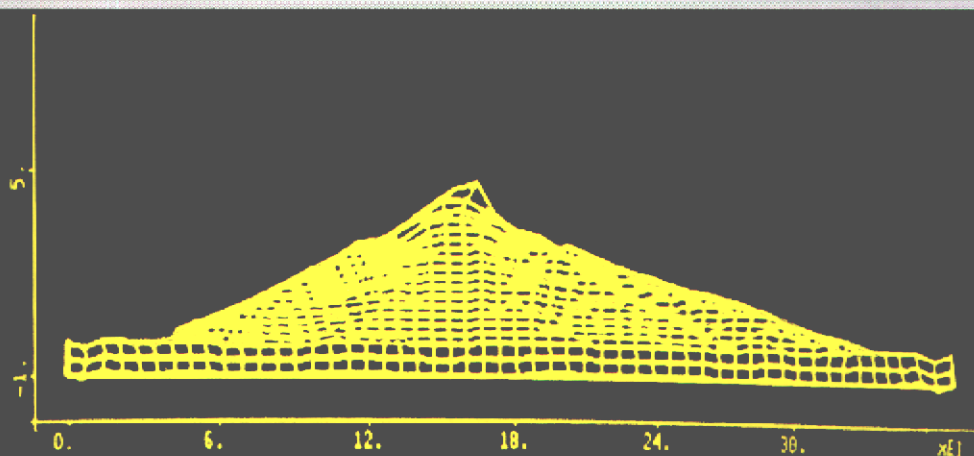
# COMPUTER SOFTWARE FOR DAMS. VALIDATION.

*Comments and proposals*

# LOGICIELS DE CALCUL DES BARRAGES. VALIDATION.

*Réflexions et propositions*

**Bulletin 94**



**1994**

Cover photograph

Typical embankment dam  
Coupled dynamic analysis : irrecoverable settlements  
(GEFDYN Software).

By courtesy of Coyne & Bellier and Ecole Centrale de Paris.

*Photo de couverture*

*Exemple d'un barrage en remblai  
Calcul dynamique couplé : tassements irréversibles  
(Logiciel GEFDYN).*

*Avec l'aimable autorisation de Coyne et Bellier et de l'École Centrale de Paris.*

Original text in English

French version by B. Tardieu.

*Texte original en anglais*

*Version française par B. Tardieu.*

**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.

# **COMPUTER SOFTWARE FOR DAMS. VALIDATION.**

---

*Comments and proposals*

# **LOGICIELS DE CALCUL DES BARRAGES. VALIDATION.**

---

*Refléxions et propositions*

**AD HOC COMMITTEE ON COMPUTATIONAL ASPECTS  
OF ANALYSIS AND DESIGN OF DAMS  
COMITÉ AD HOC DES MÉTHODES DE CALCUL DES BARRAGES  
(1987-1993)**

<b>Chairman/Président</b>	
<b>Italy/Italie</b>	<b>M. FANELLI</b>
<b>Members/Membres</b>	
<b>Finland/Finlande</b>	<b>E. LOUKOLA</b>
<b>France</b>	<b>B. TARDIEU</b>
<b>Great Britain/Grande-Bretagne</b>	<b>O. C. ZIENKIEWICZ</b>
<b>Italy/Italie</b>	<b>G. GIUSEPPETTI</b>
<b>Japan/Japon</b>	<b>K. BABA</b>
<b>Switzerland/Suisse</b>	<b>R. DUNGAR</b>
<b>USA/États-Unis</b>	<b>C. H. YEH</b>

---

## SOMMAIRE

---

### AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION : ANTÉCÉDENTS, OBJET ET CONTENU DU BULLETIN
2. NOTIONS CLÉS DE LA PROCÉDURE DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE
3. CONCEPT D'ATELIER DE BANC D'ESSAI
4. ORGANISATION DES BANCS D'ESSAI
5. THÈMES PROPOSÉS AUX BANCS D'ESSAI
6. EXEMPLE DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'UN BANC D'ESSAI TYPE
7. CONCLUSIONS
8. RÉFÉRENCES

### ANNEXE

---

## CONTENTS

---

### FOREWORD

1. INTRODUCTION : BACKGROUND, SCOPE AND CONTENTS OF THE BULLETIN
2. KEY ASPECTS OF THE NUMERICAL MODELLING PROCESS
3. CONCEPT OF BENCHMARK-WORKSHOPS
4. ORGANIZATION OF BENCHMARK-WORKSHOPS
5. PROPOSED WORKSHOP-BENCHMARK THEMES
6. EXAMPLE OF PRESENTATION OF RESULTS FOR A TYPICAL BENCHMARK-WORKSHOP
7. CONCLUSIONS
8. REFERENCES

### APPENDIX

---

# TABLE DES MATIÈRES

---

AVANT-PROPOS .....	8
1. INTRODUCTION : ANTÉCÉDENTS, OBJET ET CONTENU DU BULLETIN .....	10
2. NOTIONS CLÉS DE LA PROCÉDURE DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE .....	16
2.1. Considérations générales .....	16
2.2. Terminologie de l'ingénieur de barrage .....	16
2.3. Justification .....	18
2.3.1. Remarques générales .....	18
2.3.2. Catégories de justification .....	20
2.3.3. Justification des procédures de modélisation .....	22
2.3.4. Domaine de pertinence .....	26
2.4. Validation .....	30
2.5. Assurance qualité .....	34
2.6. Critères de validation .....	34
2.6.1. Remarques générales .....	34
2.6.2. Solutions uniques .....	34
2.6.3. Solutions potentiellement non-unicques .....	38
2.7. Phénomènes et hypothèses de modélisation .....	40
2.7.1. Remarques générales .....	40
2.7.2. Phénomènes spécifiques aux barrages en béton .....	42
2.7.3. Phénomènes spécifiques aux barrages en remblai .....	44
2.7.4. Remarques sur la détermination des données .....	44
2.7.5. Remarques sur les résultats attendus .....	46
3. CONCEPT D'ATELIER DE BANC D'ESSAI .....	48
4. ORGANISATION DES BANCS D'ESSAI .....	52
5. THÈMES PROPOSÉS AUX BANCS D'ESSAI .....	58
5.1. Catégories proposées pour les bancs d'essai .....	58
5.1.1. Catégories des bancs d'essai standards .....	58
5.1.2. Cas à traiter dans les bancs d'essai .....	58

---

# TABLE OF CONTENTS

---

FOREWORD .....	9
1. INTRODUCTION : BACKGROUND, SCOPE AND CONTENTS OF THE BULLETIN .....	11
2. KEY ASPECTS OF THE NUMERICAL MODELLING PROCESS .....	17
2.1. General considerations .....	17
2.2. Terminology of the dam engineer .....	17
2.3. Justification .....	19
2.3.1. General remarks .....	19
2.3.2. Categories of justification .....	21
2.3.3. Justification of modelling procedures .....	23
2.3.4. Range of pertinence .....	27
2.4. Validation .....	31
2.5. Quality assurance .....	35
2.6. Criteria for validation .....	35
2.6.1. General remarks .....	35
2.6.2. Unique solutions .....	35
2.6.3. Potentially non-unique solutions .....	39
2.7. Phenomena and modelling assumptions .....	41
2.7.1. General remarks .....	41
2.7.2. Phenomena specific to concrete dams .....	43
2.7.3. Phenomena specific to embankment dams .....	45
2.7.4. Remarks on data determination .....	45
2.7.5. Remarks on expected results .....	47
3. CONCEPT OF BENCHMARK-WORKSHOPS .....	49
4. ORGANIZATION OF BENCHMARK-WORKSHOPS .....	53
5. PROPOSED WORKSHOP-BENCHMARK THEMES .....	59
5.1. Proposed benchmark categories .....	59
5.1.1. Standard benchmark categories .....	59
5.1.2. Benchmark cases .....	59



5.2. Exemples de bancs d'essai - Exemple type pour un atelier de banc d'essai	62
5.2.1. Discussion préliminaire .....	62
5.2.2. Analyse linéaire d'un barrage-voûte .....	64
5.2.3. Calcul sismique non-linéaire d'un barrage en remblai .....	70
5.2.3.1. Maillage d'éléments finis .....	70
5.2.3.2. Propriétés des matériaux - Généralités .....	72
5.2.3.3. Propriétés pour un calcul équivalent linéaire .....	76
5.2.3.4. Autres propriétés des matériaux .....	78
5.2.3.5. Enregistrements d'accélération sismique .....	78
5.2.3.6. Présentation des résultats .....	80
5.2.4. Analyse statique et réponse sismique d'un barrage en remblai .....	80
5.2.4.1. Propriétés des matériaux .....	82
5.2.4.2. Définition des calculs statiques .....	84
5.2.4.3. Définition du calcul dynamique .....	86
5.2.4.4. Autres informations .....	86
<b>6. EXEMPLE DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'UN BANC D'ESSAI TYPE</b> .....	<b>88</b>
6.1. Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : thème A (barrage-voûte en béton) .....	88
6.2. Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : thème B (barrage en remblai) .....	90
<b>7. CONCLUSIONS</b> .....	<b>94</b>
<b>8. RÉFÉRENCES</b> .....	<b>100</b>
ANNEXE - Figures 1 à 20 .....	102

5.2. Benchmark examples - Example format for a benchmark-workshop .....	63
5.2.1. Preliminary discussion .....	63
5.2.2. Linear analysis of an arch dam .....	65
5.2.3. Non-linear seismic analysis of an embankment dam .....	71
5.2.3.1. Finite element mesh .....	71
5.2.3.2. Material properties - General .....	73
5.2.3.3. Properties for an equivalent-linear analysis .....	77
5.2.3.4. Other material properties .....	79
5.2.3.5. Earthquake acceleration records .....	79
5.2.3.6. Presentation of results .....	81
5.2.4. Static analysis and seismic response of an embankment dam .....	81
5.2.4.1. Material properties .....	83
5.2.4.2. Definition of static analyses .....	85
5.2.4.3. Definition of dynamic analysis .....	87
5.2.4.4. Other information .....	87
6. EXAMPLE OF PRESENTATION OF RESULTS FOR A TYPICAL BENCHMARK-WORKSHOP .....	89
6.1. Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (Concrete Arch Dam) .....	89
6.2. Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme B (Embankment Dam) .....	91
7. CONCLUSIONS .....	95
8. REFERENCES .....	100
APPENDIX - Figures 1 to 20 .....	102

---

## AVANT-PROPOS

---

L'idée d'un Bulletin sur la validation des logiciels de calcul des barrages est apparue pour la première fois à la réunion du Comité *ad hoc* des Méthodes de Calcul des Barrages à Capri, en novembre 1989. Plusieurs possibilités de thème de rapport y avaient été analysées. La description des méthodes de calcul, ou une présentation de la technique actuelle, n'aurait eu qu'une valeur temporaire à cause de la rapidité de leur évolution.

A l'inverse, les idées et les critères qui permettraient une réelle « validation » des outils de calcul ont été jugés d'une valeur plus permanente, et ceci d'autant plus que l'on traiterait en même temps du bon usage de ces outils de calcul par les ingénieurs praticiens. En fait, ces sujets, bien qu'ils soient d'importance majeure, ne sont ni évidents ni simples à traiter, et de plus on leur apporte en général une attention critique insuffisante.

L'idée d'un Bulletin sur la validation fut officiellement proposée à la 58<sup>e</sup> Réunion Exécutive de la Commission Internationale des Grands Barrages à Sydney et acceptée dans son principe.

Ce Bulletin essaie de concrétiser les idées présentées ci-dessus. C'est le résultat d'un effort collectif de tous les membres du Comité. Les observateurs, au cours des réunions du Comité *ad hoc*, ont aussi contribué à la préparation du Bulletin par leurs interventions orales. Les membres du groupe de travail italien sur les méthodes de calcul des barrages (dans le cadre du Comité Italien des Grands Barrages), ainsi que les Comités Nationaux d'Allemagne et des États-Unis ont présenté d'utiles suggestions. Qu'ils soient tous vivement remerciés.

Les Présidents de la CIGB, M. Jan Veltrop et M. Pircher, et le Secrétaire Général de la CIGB, M. Cotillon, ont constamment encouragé ce travail. Nous les remercions vivement de leur appui.

M. Fanelli  
Président du Comité *ad hoc*  
des Méthodes de Calcul des Barrages

---

## FOREWORD

---

The idea of a report on validation of computer software for dam analysis first arose during a meeting of the *ad hoc* Committee on Computational Aspects of Dam Analysis and Design held in Capri (Italy) during Nov. 1989. On that occasion, several possibilities for a Report theme were analysed. It was concluded that description of computational methods, or a state-of-the-art review, would only be of temporary value, given the fast pace of new developments.

On the contrary, ideas and criteria for effective "validation" of computational tools were deemed to be of more permanent value, while at the same time covering important aspects of the correct use of these tools by practitioners. In fact, certain aspects, although of primary importance, are far from obvious or simple, and moreover they are frequently given insufficient critical attention.

The idea of a report on "validation" was officially proposed at the ICOLD 58th Executive Meeting in Sydney and accepted in principle.

This work tries to put on paper the above-said ideas. It is the outcome of collective efforts on the part of all Committee members. Observers at the *ad hoc* Committee meetings also contributed by way of verbal discussions. Members of an Italian Working Group on Computational Aspects of Dam Analysis and Design (in the framework of ITCOLD), and the German and US National Committees offered useful suggestions. They deserve our best appreciation.

Constant encouragement and support was provided by the ICOLD Presidents, Mr. Jean Veltrop and Mr. Pircher, and by the ICOLD Secretary General, Mr. Cotillon. This very essential support is here gratefully acknowledged.

M. Fanelli  
Chairman, *ad hoc* Committee on  
Computational Aspects of Dam Analysis and Design

---

# 1. INTRODUCTION : ANTÉCÉDENTS, OBJET ET CONTENU DU BULLETIN

---

Les ingénieurs de barrages se reposent de plus en plus sur les ordinateurs et les logiciels pour faire leur projet ou pour prendre des décisions.

Il est facile et rassurant de penser que ces outils sont d'une grande aide, non seulement parce qu'ils permettent de résoudre des problèmes de calculs et de projet, mais aussi parce que cette aide est sûre et aisée.

Il est aussi facile de se forger le sentiment (à partir des publications) que la modélisation numérique progresse de façon constante et très rapide, au point que l'on pourrait croire que tous les « problèmes de barrages » peuvent être résolus à l'aide de logiciels. Cependant, une telle attitude subconsciente des ingénieurs de barrages serait une erreur car elle ne permet pas de porter un jugement critique sur la capacité réelle de la modélisation numérique par ordinateur.

Il est tout à fait évident que beaucoup de choses peuvent aller mal quand on utilise des logiciels.

Il peut y avoir des erreurs dans la programmation des logiciels (1), mais en dehors de cela, à chaque phase de l'utilisation du logiciel, l'utilisateur doit faire des choix qui ne sont pas forcément bien adaptés aux informations dont il dispose ou à ses objectifs. Il court donc le risque d'aboutir à des conclusions erronées.

Nous devons distinguer trois notions qui sont aussi trois phases fondamentalement différentes de l'utilisation des logiciels qui requièrent de la part de l'utilisateur un suivi particulier afin d'éviter des erreurs dangereuses.

- La première notion, peut-être la plus importante pour l'ingénieur de barrage, est la **justification** de l'ensemble de la procédure de calcul, de la méthode de calcul, qui est en fait sa capacité à représenter la **réalité physique**.

Par ce terme, nous signifions la démonstration que le modèle physique théorique qui sous-tend la théorie de base, la formulation mathématique de cette théorie et sa concrétisation dans les équations programmées par le logiciel, ainsi que les choix de l'utilisateur, fournissent une approximation « raisonnablement bonne » du comportement de la structure réelle.

On verra que cet objectif ne peut être atteint que dans un sens limité.

- La seconde notion (qui est traitée en détail dans ce Bulletin) est la **validation** du logiciel choisi pour réaliser un calcul particulier.

---

(1) Les erreurs dans la programmation des logiciels sont généralement appelées « bogues » du nom de l'écorce piquante des châtaignes.

---

---

# 1. INTRODUCTION : BACKGROUND, SCOPE AND CONTENTS OF THE BULLETIN

---

Practising dam engineers are more and more frequently relying on the use of computer hardware and software for their design choices or for operational decisions.

It is easy and reassuring to think not only that these tools are a great help toward “ solving ” analysis and design problems, but also that this help is safe and painless.

It is also easy to form an impression (from current literature) that a very fast, continuous progress is being made in numerical modelling, to the point of believing that all “ dam problems ” will eventually be computer-solvable. However, such a sub-conscious attitude on the part of practising dam engineers fails to critically consider the actual state of computerized numerical simulation.

It is quite obvious that many things can go wrong in using computer software.

Apart from downright errors in the software coding (1), at each phase of software utilization the user can make choices that may not necessarily be correctly related either to his information or to his objectives. He will thus run the risk of drawing improper conclusions.

We need to distinguish between three different critical aspects, or phases, of computer software use, during which the user should take special caution in order to avoid dangerous mistakes :

- The first aspect, maybe the most interesting for dam engineers, concerns the **justification** of the whole underlying process, that is its relevance to **physical reality**.

By this we mean the demonstration that the ideal physical model underlying the basic theory, the mathematical formulation of that theory and the implementation of the numerical code solving the relevant equations, as well as the user’s choices, give a “ reasonably close ” approximation of the behavior of real structures.

It will be seen that this goal can only be achieved in a limited sense.

- The second aspect (which will be treated in detail in this Bulletin) is the **validation** of the software chosen for a particular application.

---

(1) Errors in computer coding are generally called “ bugs ”.

En cela, nous signifions les activités qui donnent à l'utilisateur l'assurance que le logiciel lui donne la « réponse correcte » au problème de calcul qu'il a l'intention de résoudre.

Bien sûr, cette réponse n'est « correcte » que dans le cadre limité du modèle idéalisé dont on a supposé qu'il fournissait l'interprétation la plus adaptée du monde réel.

Il faut aussi acquérir une certitude raisonnable que tous les logiciels qui prétendent appliquer la même théorie de base, avec les mêmes hypothèses et les mêmes simplifications, donnent des résultats suffisamment concordants lorsqu'ils sont utilisés pour la résolution du même problème.

• La troisième notion est associée à la notion d'**assurance qualité** de l'ensemble de la procédure de calcul. Elle engage à la fois la phase de *validation* et la phase de *justification*.

En pratique, ceci inclut tout ce qui peut assurer que l'application qui est faite sera exactement reproductible grâce à une documentation et à des procédures décrivant chaque étape de l'application particulière.

De cette façon, la procédure peut au moins être vérifiée sans ambiguïté pour éviter les erreurs possibles. L'assurance qualité ne peut, par elle seule, garantir que les résultats sont corrects. Elle peut cependant, au moins, contraindre l'utilisateur à concentrer son attention sur chacun des choix qu'il fait, en évitant les ellipses et les hypothèses d'évidence qui empêchent la reproduction fidèle de ce qu'on a fait.

Ainsi, une évaluation neutre de la procédure complète est possible.

Résoudre des problèmes d'ingénieurs demande toujours plus de discernement et de jugement que ce que recouvrent les trois notions précédentes relatives à l'utilisation des logiciels.

Le discernement et le jugement auront à s'exercer à la fois avant le choix du logiciel et après qu'on aura obtenu des résultats afin d'évaluer si ceux-ci peuvent être incorporés dans une solution « acceptable » du problème réel qu'il faut résoudre.

Ce Bulletin, qui a pour objectif de fournir un guide et des aides au contrôle afin d'assurer un bon usage des logiciels, ne couvre qu'une part réduite de l'ensemble de la procédure de conception qui comprend d'autres éléments, comme en particulier l'appréciation de l'expert.

Dans ce Bulletin, nous allons d'abord essayer de définir, aussi précisément que nous le pouvons, le sens des trois termes que nous avons introduits ci-dessus, c'est-à-dire la validation, l'assurance qualité et la justification.

En faisant cela, nous arrivons à la conclusion que des définitions rigoureuses sont difficiles à établir et, si elles l'étaient, seraient probablement trop abstraites pour être d'une utilité pratique.

Nous choisissons alors de proposer une procédure pratique par laquelle le logiciel pourra être soumis à une série de tests. Le résultat positif à ces tests constituera alors, dans un sens limité, une « validation ».

By this we mean those activities tending to satisfy the user that the software he is going to use gives the “correct answer” to the **computational** problem he intends to solve.

Of course, this is meant within the framework and with all the limitation/uncertainties of the idealized “model” one has assumed to give the best interpretation of real-world engineering problem.

We mean also a reasonable certainty that all existing numerical codes resorting to the same basic theory, assumptions and idealizations will give fairly consistent results when applied to the same problem.

- The third aspect is somewhat loosely associated with **quality assurance** of the whole computational process, which is really related to both the phases of *validation* and *justification*.

In fact, all that can be ensured by proper documentation, activities and procedures covering each stage of a particular application is that the application itself will be exactly repeatable in the future.

In this way the process can be at least unambiguously checked at every successive time for possible mistakes. This meaning clearly entails that “quality assurance” cannot guarantee, by itself, “correct results”. It will, however, at least constrain the user to focus conscious attention on every choice and to avoid any shortcut – or implicit assumption – that may jeopardize faithful reproduction of what has been done.

Thus a critical, independent evaluation of the complete process is made possible.

The “solving” of engineering problems will always require more insight and judgement than entailed in the three above-mentioned aspects of software use.

This insight and judgement will have to be exercised both before the software choice and after the computational runs, if the computer results are to be correctly incorporated into an “acceptable” solution to the given real-world problem.

The problem of setting out guidelines, or checks, for safe use of software, as addressed in this Bulletin, is thus only a restricted part of the engineering process which indeed includes other components, such as the opinion of the expert.

In this Bulletin, we first try to define, as precisely as possible, the meaning of the three terms which were introduced above, namely *validation*, *quality assurance*, and *justification*.

In so doing, we have to conclude that rigorous definitions are difficult to formulate, and would probably prove too abstract to be of real use.

We then choose instead to outline a pragmatic procedure by which engineering software could be subjected to a series of tests. The positive outcome of such tests would then constitute, in a limited sense, “validation”.



Si les tests sont relatifs à un barrage donné, pour lequel on peut disposer de suffisamment d'informations détaillées et précises sur les chargements, les propriétés des matériaux, le comportement observé, alors on peut se donner pour objectif la justification de la procédure globale, cette justification étant démontrée pour une certaine classe de problèmes que l'on appelle le « champ de pertinence » de la méthode (voir chapitre 2.3.4.).

Nous proposons alors que ce Comité CIGB des méthodes de calcul des barrages organise systématiquement une série d'ateliers « banc d'essai » où ces tests seront réalisés pour une liste de problèmes types de barrages. Dans les chapitres finaux, nous exposons les critères généraux pour tenir de façon efficace ces « bancs d'essais » et pour en évaluer la qualité. Des exemples de données de tests, des présentations de résultats tirés des premiers « bancs d'essais » sont présentés pour faciliter la compréhension.

Quelques considérations finales sont résumées dans la conclusion de notre Bulletin.

If the tests pertain to a given dam about which sufficiently detailed and precise information is available (on loads, material properties, observed behavior), then also a “justification” of the underlying process could be achieved for a limited “field of pertinence” (“Pertinence” being a more technical term conveying a meaning analogous to “relevance” in colloquial language; see § 2.3.4.).

We then propose that an ICOLD Committee for Computational Aspects of Dam Analysis and Design should systematically organize a series of “Benchmark-Workshops” to carry out such tests for a list of “typical” dam problems. In the final chapters we set out the general criteria for efficiently holding and evaluating such Benchmark-Workshops. Examples of data sets, as well as of result presentations, are taken from the first Benchmark-Workshop and are included for greater clarity.

Some final considerations conclude our Bulletin.

---

## 2. NOTIONS CLÉS DE LA PROCÉDURE DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE

---

### 2.1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La procédure de modélisation numérique n'est qu'une pratique de la tâche d'un ingénieur, mais comme c'est une procédure formalisée, la question de sa qualité peut et doit être analysée de façon rationnelle.

Pour cette raison, la procédure de vérification de la qualité doit être scindée de la manière proposée au paragraphe 1, selon trois notions différentes :

- justification de la méthode complète de modélisation,
- validation du logiciel,
- assurance qualité de l'application particulière.

Beaucoup d'ingénieurs vous diront simplement que la preuve de la qualité d'une procédure de modélisation numérique est « la démonstration que la procédure donne la réponse correcte aux problèmes que l'on souhaite résoudre ».

Cette réponse ne résout rien puisqu'il faut d'abord établir sans ambiguïté, et de façon consensuelle, ce que l'on appelle une réponse correcte et il apparaît vite que cela n'est pas facile en tout cas pour l'ingénierie des barrages.

### 2.2. TERMINOLOGIE DE L'INGÉNIEUR DE BARRAGE

Il est communément admis par les ingénieurs de barrage que la réponse correcte à un problème de calcul présuppose que :

i) les équations de la théorie de base de la méthode sont correctement résolues par le logiciel (et que le logiciel est correctement utilisé),

et en plus, il peut signifier l'une des propositions suivantes :

ii) la solution du problème de calcul est conforme au comportement réel de vrais barrages, ceci étant démontré par les mesures d'auscultation et les tests réalisés sur modèles physiques.

ii) que la solution est conforme aux procédures « traditionnelles », généralement acceptées par la communauté des ingénieurs, et qui reposent sur des décennies d'usage pratique.

La supposition i) implique que le logiciel a été soumis à la *validation* et que la procédure complète de calcul doit avoir été soumise au *contrôle qualité*. Pour

---

## 2. KEY ASPECTS OF THE NUMERICAL MODELLING PROCESS

---

### 2.1. GENERAL CONSIDERATIONS

The numerical modelling process is only a part of the global engineering task, but being a formalized process the question of its correctness can and should be analyzed in a rational way.

For this reason the process of the checking the correctness of process can be broken down, as introduced in chapter 1, into three aspects :

- justification of the whole modelling method,
- validation of the computer code,
- quality assurance for the particular application.

Many dam engineers will simply tell you that the proof of the “correctness” of a numerical modelling process means “a documented demonstration that the process gives the correct answer to the problem it is intended to solve”.

This, however, is only begging the question, because there should be, in the first place, a clear-cut consensus as to what is to be intended by the term “correct answer”, and it turns out that this is not easily established, at least for dam engineering.

### 2.2. TERMINOLOGY OF THE DAM ENGINEER

As commonly understood by dam engineers, **correct answer**, for a computational problem, presupposes that :

i) the equations of the basic underlying theory are correctly solved by the software (and that the software is correctly used),

and in addition it can mean either of the following two things :

ii a) that the computational solution of the problem conforms to the actual behaviour of real dams as revealed by field measurements or physical model tests, or

ii b) that the answer is consistent with the generally accepted “traditional” procedures of analysis and design, as have evolved through decades of practical use.

Requirement i) means that the software should have been subjected to *validation* and that the whole computational process should have been subjected to

satisfaire les suppositions iia) ou iib), il ne suffit pas d'utiliser correctement un logiciel validé. Il faut aussi vérifier les points suivants :

- dans le cas iia), la procédure de modélisation représente réellement, d'une certaine manière, le comportement de barrages existants et le champ de pertinence de la procédure inclut bien le type de problème à traiter,
- dans le cas iib), la procédure de modélisation peut être effectivement référée aux méthodes traditionnelles.

Les deux dernières propositions sont du domaine de la « justification ».

## 2.3. JUSTIFICATION

### 2.3.1. Remarques générales

Même si on a montré qu'un logiciel donne la « réponse correcte » pour un barrage particulier, c'est-à-dire une réponse qui est en « accord suffisant » avec les observations faites, cela ne constitue pas une preuve certaine que la « réponse correcte » sera également obtenue si on applique le logiciel à un autre barrage (2).

Par exemple, le logiciel peut ne pas représenter un ou plusieurs des phénomènes physiques qui, dans le cas étudié, n'ont que des effets négligeables ou bien ces phénomènes physiques peuvent être compensés par d'autres, également non représentés, si bien que le résultat apparaît malgré tout correct.

Cependant, il n'y a aucune certitude que ces circonstances fortuites se reproduisent de la même façon dans les applications suivantes du même logiciel.

Il n'y a pas de preuve formelle qu'un logiciel est toujours « correct » dans un champ donné d'applications.

Il faut en déduire que le bon sens et l'expérience de l'ingénieur sont vitaux à la fois dans le bon choix d'un logiciel et de la stratégie méthodologique à utiliser, et dans l'évaluation des résultats obtenus.

Le raisonnement par analogie et extrapolation est utile mais est souvent précaire.

Par exemple dans l'interprétation iib) du 2.2. ci-dessus, il est souvent difficile de réaliser une comparaison entre les « méthodes traditionnelles » et les logiciels avancés destinés au calcul des barrages. Citons la méthode de stabilité par lignes de glissement, vis-à-vis de l'évaluation du tassement du barrage en remblai, ou l'analyse globale de la stabilité d'un barrage-poids au glissement ou au renversement vis-à-vis de l'analyse des contraintes par la méthode des éléments finis. Les termes de la question et de la réponse sont qualitativement différents entre la méthode traditionnelle de stabilité et l'approche par éléments finis et ils ne sont pas faciles à rapprocher.

---

(2) C'est-à-dire un barrage du même type mais dans un contexte différent.

*quality-control*. However, to comply with iia) and iib) it is not sufficient to use a validated software in a correct way. The following remains to be ascertained :

- in case iia), that the modelling process does actually represent, to a certain extent, the behaviour of existing dams, and that its field of pertinence includes the problem to be treated, or
- in case iib), that it is possible to actually establish a link with the traditional methods.

These last two requirements are essentially covered by the term “justification”.

## **2.3. JUSTIFICATION**

### **2.3.1. General Remarks**

Even if a given computer software had been shown to give the “correct answer” for a particular dam, i.e. one in “approximate enough” agreement with field observations, this does not constitute a formal proof that the “correct answer” will be obtained when applied to a different dam (2).

For instance, the software used may fail to represent one or more physical effects that happen to have negligible influence, or by chance be cancelled out by other effects, in the case that gave the correct results.

However, no assurance can be given that this fortuitous circumstance will also hold good for all further applications of the same software.

There is no formal proof that a given software is always “correct” in a given field of application.

It follows that good engineering sense and experience are vital in the choice of the software to be used, in the selection of the strategy of use and in the evaluation of computational results.

Reasoning by analogy and extrapolation is useful, but often precarious.

As to the interpretation iib) of section 2.2. above, it is often difficult to carry out a direct comparison between “traditional” methods and advanced software for dam analysis. Suffice it to mention the slip-circle method and settlement evaluation for safety analysis of fill dams, and the global-stability analysis of a gravity dam against sliding/overturning, in comparison with the finite element method of stress analysis. The question/answer terms are qualitatively different in the “traditional” and the finite element approaches, and not easily reconcilable.

---

(2) *The meaning here is a dam of the same type but in different context.*

De plus, une telle interprétation limitée conduirait essentiellement à disqualifier, en tout cas dans la pratique, la prétention des méthodes de calcul moderne à fournir une meilleure représentation de la réalité. Cela serait en pratique en antagonisme avec l'interprétation iia) de 2.2.

Enfin, l'interprétation iib) suppose une compréhension profonde des arguments des « méthodes traditionnelles » en même temps que de leurs hypothèses non dites et de leurs limitations, ce qui n'est pas toujours à la portée de l'ingénieur moyen.

### 2.3.2. Catégories de justification

L'ingénieur est supposé capable de définir ce qui est nécessaire en terme d'équations mathématiques à résoudre.

En ce sens, nous suggérons de distinguer deux classes de problèmes.

1) Tous les modèles qui font partie de la pratique traditionnelle.

Cette classe inclut le comportement élastique, l'écoulement en milieux poreux, les problèmes thermiques, le calcul des modes propres par la méthode des éléments finis, et les méthodes de stabilité qui reposent sur des équilibres de forces.

Ces modèles ne sont pas supposés représenter parfaitement la réalité physique mais il font partie de la culture des ingénieurs depuis longtemps.

Leurs résultats peuvent donc être interprétés et jugés par des ingénieurs expérimentés à la lumière de cette expérience.

2) Toutes les méthodes qui utilisent des modèles rhéologiques, physiques ou mécaniques qui ne peuvent être jugés directement par la communauté des ingénieurs parce qu'elles sont nouvelles et ne profitent donc pas d'une longue expérience, et parce que leur capacité à représenter la réalité ne ressort pas de l'évidence.

La pratique de l'usage de tels modèles procède en partie de la recherche et en partie d'un esprit de pionnier dans le domaine des applications pratiques. Il est conforme à la tradition des ingénieurs de barrage de considérer que les barrages sont des prototypes et que la recherche doit nourrir la pratique.

Les logiciels qui exploitent de tels modèles doivent être validés. Cependant, cette procédure n'est que le test que le résultat correspond à l'intention exprimée et non pas que l'intention exprimée représente le monde réel.

Dans un sens strict, le mot **justification** ne s'applique qu'à la seconde catégorie ci-dessus parce que la première catégorie est considérée comme justifiée par la tradition des ingénieurs de barrage.

Cependant, certaines difficultés peuvent apparaître même pour cette première classe de problème.

Un bon exemple est fourni par la discussion qualitative d'un problème bien connu des ingénieurs : la détermination et l'évaluation de la distribution de contrainte à l'interface fondation/structure d'un barrage en béton.

Moreover, such a limited interpretation would essentially amount to disowning – for practical purposes at least – the often-made claims of modern computational methods to the effect that “a better representation of reality is obtained”. This would give a conflict, in practice, with interpretation iia) of section 2.2.

Lastly, interpretation iib) assumes a thorough understanding of the deep-rooted rationale behind the “traditional methods”, together with their underlying assumptions and limitations, which is not always the case of the average practising engineer.

### 2.3.2. Categories of Justification

It is assumed that the engineer is capable of defining what is required in terms of the mathematical equations to be solved.

In this respect, it is suggested that we distinguish between two families of problem :

- 1) All models which comply with traditional engineering practice.

This family includes elastic behaviour, seepage and thermal problems, eigen-modes computation by the finite element method, and stability methods based on the equilibrium of forces.

These models are not supposed to be perfectly representative of physical reality, but have been part of the engineering culture for a long time.

Furthermore, the results may be interpreted and judged by the experienced engineer.

- 2) All procedures using rheological, physical or mechanical models which are not able to be judged directly by the engineering community, because they are new and thus do not profit from extensive experience and their relevance to reality is not obvious.

The practice of using such models proceeds partly from research and partly from a professional pioneering spirit. It is in conformity with traditions in dam engineering to concede that dams are prototypes, and that research should complement practice.

Computer programs which incorporate such models have to be validated, and this process is only a test that the result complies with the requirements and not that the requirements comply with the real world.

Strictly speaking the word **justification** is relevant only to the second category above, because the first category is considered as being justified by the tradition of dam engineering.

However, some difficulties may be encountered even for this first family of problems.

A good example is a qualitative discussion of the well-known engineering problem concerning determination and evaluation of stress distribution at the foundation/structure interface of a concrete dam.



Supposons, dans un esprit de simplicité, que l'ingénieur confronté à un tel problème ait choisi de travailler dans le cadre apparemment sans ambiguïté de l'élasticité linéaire élastique.

Si l'on veut traiter correctement le problème, il faut d'abord supposer connu le fait que la solution théorique exacte des équations de l'élasticité conduit à une contrainte infinie aux pieds amont et aval de la structure.

Par ailleurs, d'un point de vue numérique (qu'il faut bien considérer puisque la solution exacte n'est pas connue sous une forme analytique), il y a de nombreuses options qui conduisent à des approximations différentes.

Si l'ingénieur se réfère à la théorie des poutres et des coques, comme dans la « trial load » ou les modèles d'éléments finis de coques épaisses, il trouve une distribution linéaire de contraintes normales finies (et une distribution parabolique des contraintes de cisaillement), ce qui est pas consistant avec les conditions aux limites. S'il choisit une méthode d'éléments finis de volume, en déformation plane ou en tridimensionnel, ses résultats seront encore finis, mais l'intensité et la distribution des contraintes dépend du maillage utilisé. S'il s'efforce d'approcher de plus en plus la solution « exacte » en raffinant progressivement le maillage (ou en utilisant des approximations polynomiales d'un degré de plus en plus élevé), il obtient des intensités de contraintes de plus en plus élevées.

En dépit de ces difficultés, dont il doit avoir bien conscience, notre ingénieur de barrage peut cependant faire un bon usage des résultats de ces calculs numériques, en s'appuyant sur l'expérience, sur les procédures « traditionnelles » de projet et sur les règles de la pratique.

Par exemple, les résultats des calculs qui reposent sur la théorie des poutres et des coques peuvent être évalués en fonction de la compatibilité entre, d'une part, la force normale et le moment fléchissant et, d'autre part, les caractéristiques de la surface de contact.

Dans les cas des calculs EF avec des éléments de volume, les valeurs locales de contraintes peuvent être intégrées sur la face de contact, de manière à obtenir, de façon analogue à ce qui précède, la force normale et le moment fléchissant transmis à travers la surface de contact.

Notre ingénieur de barrage peut aussi choisir, s'il a des informations locales suffisamment détaillées, de procéder à une analyse plus complexe (par exemple par élimination des tractions, par écoulement plastique, par représentation d'une fissure par un joint, par des zones d'endommagement, etc.).

### **2.3.3. Justification des procédures de modélisation**

Comme il n'existe pas de modèle capable de représenter tous les comportements, une des tâches de la « justification » est de définir le domaine d'application.

Un assez grand nombre de modèles de comportement a été proposé, certain d'entre eux ont conduit à des développements en analyse numérique qui permettent une application aux situations réelles de l'ingénierie.

Une fois que le logiciel correspondant a été soumis à une validation appropriée, comme elle est introduite dans les paragraphes précédents, l'utilisateur peut

Suppose, for the sake of simplicity, that the dam engineer faced with such a problem has chosen to operate within the apparently unambiguous framework of linear-elastic analysis.

For a correct treatment of his problem, he is required first of all to know –from basic theory– that the exact mathematical solution of the elasticity equations would yield infinite stress at the heel.

On the other hand, from a numerical point of view ( that he is obliged to take because the exact solution is not known in analytical form) he has many options, leading to different approximations.

If he resorts to beam/plate theory as in the trial-load or thick shell finite element models, he will find a linear distribution of finite normal stresses (and a parabolic distribution of finite shear stresses) which is not consistent with boundary constraints. If he chooses a plane or three-dimensional elastic finite element analysis, his results will again be finite, but their intensity and distribution will be mesh-dependent. If he tries to get closer and closer to the “ exact ” solution by using finer and finer meshes (or higher and higher polynomial approximations), he will get indefinitely growing stress intensities.

In spite of all these difficulties – which he should be well aware of – our dam engineer could still make good use of the results of his numerical analysis, in the light of his experience and of “ traditional ” design procedures and rules of practice.

For instance, results of beam or plate analysis could be appraised in terms of compatibility of global normal force and bending moment with the characteristics of the interface section.

In the case of F. E. analyses, the local stress results could be integrated over the section to yield again those same global normal force and bending moment transmitted across the section.

Alternatively, our dam engineer could opt, if he has sufficiently detailed local information, for stepping up to more sophisticated analyses (e.g. no-tension, plastic flow, crack or damage modelling, etc.).

### **2.3.3. Justification of Modelling Procedures**

As there is no single model capable of representing all prototype behaviours, one of the tasks of “ justification ” is to define the range of applicability.

A significantly large number of behaviour models have been proposed, some of which have involved developments in mathematical and numerical analyses which allow application to actual engineering situations.

Once the respective numerical code has been subjected to appropriate validation, such as introduced in previous sections, the user is then reason-

raisonnablement penser que le logiciel est assez précis et stable pour donner une solution correcte des équations qu'il contient.

Il reste alors à **justifier** la procédure de modélisation en démontrant qu'elle représente correctement les phénomènes observés dans la réalité et à définir le domaine de pertinence.

Les tests de justification incluent la définition de phénomènes que la modélisation numérique doit représenter et la comparaison avec les valeurs mesurées dans le monde réel. Il est aussi utile pour ces modèles de les comparer avec les méthodes conventionnelles correspondantes qui sont à la base de l'expérience et de la tradition des ingénieurs.

La **première phase** de la justification consiste à reproduire, en utilisant les logiciels, les **essais de laboratoire et les essais *in situ*** connus.

Il est alors possible, d'une part, de vérifier que le modèle est représentatif des phénomènes mesurés et, d'autre part, de calibrer les paramètres, c'est-à-dire de déterminer la procédure pratique qui permet de déterminer les valeurs des paramètres du modèle en fonction des résultats des essais. La comparaison peut aussi conduire à une meilleure définition des essais à réaliser et des mesures à faire pour fournir les paramètres du modèle. Les ateliers spécialisés qui définissent les essais pour le contrôle des modèles sont un moyen efficace de mise au point des procédures de justification et de définition du domaine de pertinence.

La **seconde phase** consiste à modéliser des situations réelles et à comparer des résultats du modèle avec le **comportement observé**, en particulier à travers les résultats de l'auscultation.

Ceci suppose que les paramètres des matériaux ont été déterminés auparavant grâce à des essais de laboratoire et à des essais *in situ*.

Cependant il est difficile, voire impossible, de réaliser ce type d'essais sur certains matériaux comme par exemple les enrochements, les matériaux de fondation, ou le béton fissuré.

Il est alors de bonne pratique d'utiliser certaines phases de chargement pour prédire les effets de chargement ultérieurs. Par exemple, il est de bonne pratique d'utiliser les résultats observés durant le début de la construction d'un barrage en remblai afin de prédire son comportement final, son comportement durant la mise en eau, durant la vidange ou sous l'effet d'un tremblement de terre.

L'analyse de situations pathologiques peut également être intéressante et suggérer des comportements à modéliser. On peut citer, par exemple, des barrages-voûtes dans lesquels des fissures se sont développées à cause d'effets hydrauliques ou thermiques, des barrages à contreforts ou des barrages-poids qui se sont fissurés, par exemple sous des effets thermiques ou sous des effets dynamiques.

Ces comparaisons permettent d'identifier un ensemble de paramètres qui représente le mieux la réalité pour une situation donnée et qui permet la corrélation avec des paramètres obtenus à partir de la calibration de ce modèle et à partir des essais de laboratoire et des essais *in situ*. Le choix des paramètres, le choix des conditions initiales, le choix des conditions aux limites, l'influence de l'histoire passée sont les choses les plus difficiles à résoudre.

ably assured that the code is precise and stable enough to solve the inherent equations.

It then remains to **justify** the modelling process by demonstrating that it correctly represents the phenomena observed in reality, and to define the range of applicability.

The justification test includes defining the phenomena that the numerical analysis code aims at representing, and making a comparison with values measured in the real world. It is also useful for these models to be compared with relevant conventional methods which are the basis of engineering experience and tradition.

The **first phase** of justification consists of reproducing, through the use of the numerical analysis codes, **laboratory and *in situ* tests**.

As a result, it is possible, on the one hand, to check that the model is representative and, on the other hand, to calibrate the parameters, that is to determine in a practical way how to set the values of the parameters of the model as a function of the test results. This comparison may also lead to a better definition of the tests to be performed and measurements to be carried out. Technical Workshops that define tests for numerical simulation are efficient means in the justification procedure and for the definition of the limits of pertinence.

The **second phase** consists of modelling real situations and comparing the results of the modelling process with **observed behaviour**, particularly as given from monitoring data.

This presumes that material parameters have been predetermined through laboratory and *in situ* tests.

However, it is difficult or impossible to carry out this type of test on certain materials – such as, for example, rock fill, foundation material and cracked concrete.

It could then be appropriate to use certain loading phases to predict the effect of further loadings. For example, it is appropriate to use monitored results at the beginning of the construction of an embankment dam in order to predict its final behaviour during impounding, drawdown or earthquake (calibration through monitoring).

The analysis of a “pathological” situation can also be of interest and can suggest the use of a model. Mention can be made, for example, of arch dams in which cracks have developed due to hydraulic or thermal effects, and buttress or gravity dams which have cracked, for example from thermal or dynamic loads.

These comparisons allow the identification of sets of parameters that best represent reality for a given situation, and thus allow correlation of parameters obtained from calibration of the model and from lab and *in situ* tests. Choosing parameters, boundary and initial conditions (influence of past history) is one of the most difficult problems to be solved.

La multiplicité des paramètres, en particulier pour les nouveaux modèles, conduit à être très vigilant lorsqu'on utilise des procédures de modélisation complexes.

Lorsque l'on utilise des modèles de comportement non-linéaire, l'utilisateur doit accorder une attention particulière aux effets de la discrétisation et à l'éventuelle non-unicité des solutions (voir en particulier le paragraphe 2.6.3).

A côté des considérations ci-dessus à propos de la définition rigoureuse de ce que l'on entend par réponse correcte dans les problèmes de barrages, il faut accorder de l'attention à ce que l'on appelle un problème correctement posé pour les problèmes de barrages et pour les problèmes de projets.

La procédure de justification ne doit pas bien sûr conduire l'ingénieur à un rôle purement passif. Comme on l'a déjà dit, les modèles mathématiques ne donnent qu'une représentation partielle de la réalité.

Il faut donc que l'ingénieur vérifie si les aspects de la réalité qu'il souhaite représenter et les conditions de cette représentation sont bien couvertes par le modèle qui est au coeur du logiciel qu'il a choisi.

Il est clair que seul l'ingénieur peut réussir cela, mais pour qu'il puisse le réussir (3) il faut encore qu'il possède les qualités suivantes :

i) une connaissance fondamentale suffisante du problème à résoudre et de sa formulation mathématique,

ii) une information suffisante sur les différents logiciels qui permettent de résoudre ces problèmes.

Ainsi i) définit le champ d'action de l'ingénieur, tandis que ii) couvre le champ d'activités du producteur de logiciels en ce qui concerne le meilleur choix de logiciels pour le problème à résoudre et la qualité des résultats. En d'autres termes, la justification est relative aux objectifs des ingénieurs.

Par exemple, si le projeteur de barrage est intéressé à connaître la distribution des contraintes non-linéaires dans une structure épaisse, il aura à choisir des éléments finis d'un ordre élevé ou utiliser beaucoup d'éléments dans l'épaisseur.

S'il est intéressé par la connaissance des concentrations de contraintes près d'un angle, les éléments finis ordinaires ne suffiront pas, ils ne sont pas justifiés, il devra utiliser des éléments incluant des singularités spéciales.

L'utilisation d'un logiciel d'éléments finis comme une boîte noire peut ignorer complètement ces considérations essentielles et rend la qualité des résultats tout à fait incertaine.

#### **2.3.4. Domaine de pertinence**

Grâce à des tests et des comparaisons, on peut justifier un modèle pour certaines classes de problèmes et dans certaines limites.

---

(3) *Il faut au moins un très efficace échange d'informations et de requêtes mutuelles entre l'utilisateur et l'auteur du logiciel. Les jargons des différentes catégories de spécialistes sont un obstacle à l'efficacité de cet échange.*

The multiplicity of parameters, especially if the model is new, suggests caution in using complex modelling processes.

Using non-linear analysis codes, the user should pay special attention to discretization effects and possible non-uniqueness of solution (see further on § 2.6.3.).

Besides the above considerations about a consistent definition of what should be intended for “correct answer” to dam problems, thought should also be given to the “correct posing” of dam analysis and design problems.

The justification process should not, indeed, assign the engineer a purely passive role. As already mentioned, all mathematical models are only partially representative of reality.

It follows that the engineer should ascertain whether those aspects of reality that are of interest to him are covered, and under which conditions, by the mathematical model underlying the chosen software.

It is also clear that only the engineer can do that (3), and that in order to do so he has to possess :

- i) sufficient basic knowledge of the problem in hand and of the mathematical formulation,
- ii) sufficient information about the basis of the different available software for the solutions of his problems.

Thus i) defines the field of action of the engineer, while ii) covers the documentation of activities carried out by the producer of the software – in respect of the proper choice for the problem in hand and of the “correctness” of results. Justification, in other words, is relative to the engineers’s objectives.

To present an example : if the dam designer is interested in investigating non-linear stress distribution in a thick structure, he will have to choose high-order finite elements, or use many elements across the thickness.

If he is interested in investigating stress concentration near a corner, ordinary finite elements will not suffice (not “justified”) and he will have to use finite elements including special singularities.

Black-box use of finite element software would completely by-pass those essential considerations, and render the correctness of results uncertain.

#### **2.3.4. Range of Pertinence**

By tests and comparisons, it could be determined that the model is justified for certain classes of problem and within certain limits.

---

*(3) Alternatively, there should be at least a very efficient interchange of information and enquiries between user and originator of software. Specialized jargons of different categories of specialists can be a barrier to effective communication.*

Ce domaine, pour lequel l'utilisation du modèle est justifiée est appelé ici **domaine de pertinence**.

La pertinence d'un modèle et ses limites ne peuvent pas être démontrées sans l'assistance d'experts qui sont les seuls qualifiés pour vérifier la justesse d'une prédiction.

Un bon résultat d'ensemble n'est pas incompatible avec des incohérences et des inexactitudes dans les détails qui s'opposent à la justification du modèle.

Par exemple, le tassement d'un barrage en remblai ou le déplacement en crête d'un barrage-voûte peut être obtenu de façons tellement différentes qu'un résultat conforme aux mesures ne donne pas une preuve suffisante de la qualité du modèle numérique en comparaison avec le comportement réel.

Le rôle des experts peut être défini ainsi :

- vérifier l'adéquation du modèle rhéologique, évaluer si les hypothèses faites sont capables de rendre compte des phénomènes majeurs qui influencent le comportement d'un barrage,
- vérifier la cohérence des résultats avec ceux qui sont obtenus par les méthodes conventionnelles ou par des modèles qui sont déjà mieux connus,
- rechercher les contradictions entre les résultats et les mesures disponibles : juger de la validation des résultats, de la capacité de définir les paramètres grâce aux essais ou par évaluation progressive durant la construction; évaluer l'effet des conditions limites et des conditions initiales et la capacité à les prendre en compte; évaluer le degré de confiance des résultats en fonction de l'imprécision des données.

La procédure peut être considérée comme justifiée une fois que le **domaine de pertinence** de la modélisation numérique est établi en fonction du type de matériaux, du type de barrage, du type de chargement et des conditions limites imposées et ceci sur la base d'un nombre suffisant d'analyses détaillées de barrages.

Il faut indiquer la variation des résultats en fonction de la variation de ces données.

Une fois que la procédure a été justifiée et que son domaine de pertinence a été défini, les promoteurs de logiciels et de la procédure associée doivent proposer une méthode d'usage de la procédure et du logiciel.

Les bases physiques et mathématiques doivent être définies ainsi que les procédures à suivre pour obtenir les paramètres et la manière d'utiliser les résultats et de les interpréter.

Il faut, si possible, inclure dans le logiciel lui-même la méthode de détection des données erronées, les incohérences apparentes dans les données et les diagnostics de non-convergence ou de résultats douteux.

Pour détecter les erreurs de logiciels qui peuvent apparaître lorsque ceux-ci sont utilisés pour des parties non testées, une assistance doit être fournie.

Ces méthodes sont encore à la limite entre la recherche et l'usage professionnel.

This range, in which the use of the model is justified, is called here the **range of pertinence**.

The pertinence of a model and its limits cannot be demonstrated without the assistance of experts who are the only individuals qualified to verify the justness of the prediction.

A good overall result can conceal incoherences and inaccuracies in detail which oppose the justification of the model.

For example, the settlement of an embankment dam or the crown displacement of an arch dam can be obtained in so many different ways that a good result cannot be taken as sufficient proof that the numerical analysis agrees with real world behaviour.

The expert's role can be defined as follows :

- check the adequacy of the rheological model; evaluate if assumptions are capable of taking into account the major phenomena influencing the behaviour of a dam;
- check the coherence of results with those obtained by conventional methods or by models that have been more thoroughly investigated,
- search for any contradictions between the results and available measurements; judge the validity of the results, the capacity to define parameters through tests (or through progressive evaluation during construction); evaluate the effect of boundary and initial conditions and the capacity to take these into account; evaluate the degree of reliability of results related to the uncertainty of the data.

The code can be considered as justified once the **field of pertinence** of the numerical analysis code as a function of the type of material, the type of dam, the type of loading and the imposed boundary conditions has been established from a sufficient number of detailed analyses of dams.

The variability of the results as a function of this data must be indicated.

Once the code has been justified and its range of pertinence defined, the party promoting the code must propose a method as to how to use the code.

Its physical and mathematical bases have to be defined, as well as the procedures to follow to obtain the parameters, how to use the results and how to interpret them.

If possible, included in the code itself should be a method of detecting erroneous data, any apparent incoherence in the data and diagnosis of non-convergence or dubious results.

Help should be provided to detect software errors, which can come into play when using the program in an otherwise un-tested way.

These methods are still at the limit between the stage of research and professional use.



Cette situation est tout à fait familière aux ingénieurs qui projettent des barrages qui, parce qu'ils doivent s'intégrer à la nature, sont toujours des structures prototypes.

Pendant encore plus que pour l'analyse des structures conventionnelles, ces méthodes doivent être appliquées par des équipes d'ingénieurs hautement spécialisés.

## 2.4. VALIDATION

Globalement, on assiste à une certaine résignation inconsciente devant le fossé qui se creuse dans le langage et dans la connaissance entre les ingénieurs praticiens et les spécialistes d'analyses numériques.

Ainsi, bien souvent les ingénieurs praticiens se résignent à déléguer aux ingénieurs spécialistes en analyse numérique l'examen critique du bien-fondé de l'usage d'un logiciel.

À côté de cela, il y a une tendance répandue chez les ingénieurs praticiens d'utiliser les logiciels comme des « boîtes noires » en particulier lorsqu'ils les utilisent eux-mêmes.

En d'autres termes, la question de la « validation » des logiciels n'est pas souvent discutée dans le milieu des ingénieurs de barrages, bien que l'on y ait accordé une importance particulière dans d'autres environnements techniques, par exemple dans l'industrie nucléaire.

Il n'y a pas de doute que si l'on demandait à des ingénieurs de barrages s'il est nécessaire de valider les logiciels de calculs de barrages, ils déclareraient qu'ils sont favorables à cette idée.

Pendant, il n'est vraiment pas facile de définir précisément ce que veut dire validation, ni même de se mettre d'accord sur la définition.

Le sens donné par l'usage commun du mot « validation » au sens large n'est pas d'une grande aide, car il est vraiment trop vague.

« Validation » signifie littéralement rendre valide soit en substance, soit dans un sens juridique.

En particulier, ce sigle peut ainsi signifier : assurer et certifier qu'un outil donné est valide, c'est-à-dire adéquat pour effectuer une certaine tâche d'une manière correcte.

Mais cela peut aussi signifier qu'une entité donnée a été reconnue comme ayant toutes les capacités requises pour être acceptée d'une façon formelle au sein d'une communauté d'entités similaires et qui, par un consensus préalable, sont autorisées à assurer certaines fonctions.

Pendant, si c'est le sens commun du mot, son contenu sémantique lorsqu'il est appliqué par les ingénieurs de barrages aux logiciels de calcul devient beaucoup plus fragmentaire et mal défini.

De plus, il peut être raisonnablement admis que le champ du mot « validation » pourrait alors être élargi afin d'inclure le choix correct d'un logiciel, parmi

This situation is quite familiar to engineers who design dams which, due to the fact that they must be integrated into natural situations, are always prototype structures.

However, even more so than in the case of conventional analysis of structures, these methods must be applied by highly specialized teams of engineers.

## 2.4. VALIDATION

On average there has developed a subconscious resignation to the knowledge/language gap which now exists between practising professionals and the specialist concerned primarily with numerical analysis.

Thus, there is – more often than not – a readiness to delegate a critical examination of the “design-worthiness” of computer software to the computer-oriented specialist.

Besides, there is a widespread trend for dam analysis software to be used by design professionals (when they use it directly at all) as a “black box”.

In other words, the question of “validation” of computer software is not often discussed in dam engineering circles, although it has been given keen attention in other technical environments (for example, in the nuclear industry).

No doubt, if one should ask dam engineers about the necessity for “validation” of computer codes for dam analysis and design, they would declare that they are supportive of the idea.

However, what precisely is meant by the term “validation” is by no means easy to define, or even to agree upon in a consistent manner.

Common understanding and colloquial use of the loose term “validation” is not enlightening, as it is readily seen to be too vague.

“Validation” literally means “to make valid”, either in a substantial or in a legal sense.

In particular it thus means to ensure (and certify) that a given tool is “valid” – i.e. adequate – for performing a certain task “in the correct way”.

Alternately, it can mean that a given entity has been recognized as having all the credentials required for acceptance in a formal way into a community of similar entities which, by previous consensus, are entitled to perform certain functions.

However, if this is the common-language use of the term, the semantic content of it when applied by dam engineers to computer software becomes much more elusive and ill-defined.

In addition, it might be reasonably contended that the scope of the term “validation” could be broadened to include the correct choice among many

plusieurs logiciels de calcul, tous correctement validés, mais caractérisés par différents degrés d'approximation et différents coûts.

Un exemple fréquemment utilisé est celui des calculs d'avant-projet sommaire et de l'exploration paramétrique associée.

A ce niveau, un calcul par éléments finis, certainement valide au sens strict, n'est en général pas le bon choix (valide) en terme d'efficacité.

Dans cet esprit « validation » inclurait d'abord le choix de l'outil de calcul approprié, techniquement et économiquement, et ensuite la « validation », au sens strict du terme de l'outil choisi.

Ainsi qu'il le veuille ou pas, l'ingénieur ne peut espérer qu'il existe un logiciel « valide », d'une façon générale, de même qu'il ne peut complètement déléguer la validation de ce « bon » logiciel à un spécialiste.

Ces difficultés pourraient être diminuées par un logiciel de choix conversationnel, dans lequel l'utilisateur serait tenu par la main au travers d'un arbre logique de choix dichotomiques et une série de questions/réponses soigneusement organisée ou par l'usage d'un système expert.

Cependant, ces outils ne sont pas disponibles pour l'instant pour les ingénieurs de barrages (voir note 3 de la page 26).

L'organigramme (Fig. 1) (\*) devrait aider à visualiser les étapes logiques et les étapes de décision à prendre respectivement par les promoteurs de logiciels et par les utilisateurs de logiciels ainsi que les zones d'interaction (voir note 3 page 26).

Des considérations ci-dessus, il pourrait sembler naturel de conclure que la meilleure situation est celle où l'ingénieur de barrages est aussi le promoteur du programme de calcul.

C'était en fait souvent la tendance jusqu'à récemment. Cependant la spécialisation et la sophistication croissante de l'informatique font qu'il est de plus en plus difficile pour la moyenne des ingénieurs de barrages de produire des logiciels efficaces et à la pointe du progrès.

Ainsi, la situation idéale ne peut être proposée comme un modèle général.

De la même façon, l'intuition physique et le jugement des ingénieurs, associés avec l'expérience indéniable et abondante du succès de l'analyse des contraintes (et la mécanique des milieux continus en général), nous indiquent qu'il existe bien des « logiciels de barrages validés ».

Le problème réside dans notre capacité à mieux articuler ce concept, au moins dans un contexte compréhensible et opératoire.

Il est certainement intéressant de chercher à donner une définition utilisable du terme « validation » et de la discuter.

En ce sens au moins, une partie des ambiguïtés implicites, soulignées ci-dessus, pourrait être ou évitée ou au moins exhibée pour que tous les ingénieurs concernés la voient et y prennent garde.

---

(\*) Toutes les Fig. sont rassemblées à la fin du Bulletin.

computer codes, all properly “ validated ”, but characterized by different degrees of approximation and different costs.

An example often made relates to preliminary design analysis and to parametric explorations.

At this stage, a finite element analysis, certainly “ valid ” in a strict sense, is usually not the proper (“ valid ”) choice in terms of cost/result effectiveness.

In this spirit, “ validation ” would include first the choice of the “ proper ” analytical tool (technically and economically-wise) and then the validation (in the strict sense) of the chosen tool.

Thus, willingly or not, the engineer cannot hope for a “ general purpose ” validated software, nor can he completely delegate the “ validation ” of the “ right ” software to the specialist.

These difficulties could be alleviated by a conversational (tutorial) software-choice guide, in which the user would be led “ by hand ” down a logical tree of dichotomic choices through a carefully planned question-and-answer session, or by the use of a full-fledged “ expert system ”.

However, those tools are not presently available to dam engineers (see footnote 3 on page 27).

The flow-diagram (Fig. 1) (\*) should help in visualizing the logical steps and decisions to be taken respectively by software originators and software users, as well as the areas of interaction (see again footnote 3, page 27).

From the above considerations, it would seem natural to conclude that the best situation would call for the dam engineer to be also the originator of the computer program.

This in fact was often the trend in former days; however, the increasing specialization and sophistication of computer science makes it more and more difficult for the average dam engineer to be able to produce efficient, state-of-the-art software.

So this “ ideal ” situation cannot be proposed as a general model.

All the same, physical intuition and sound engineering judgement, joined with undeniable, abundant experience of the wide-ranging successes of stress-analysis (and mechanics of continua in general) tell us that there is such a thing as a “ validated dam software ”.

The problem consists in our ability to better articulate this concept at least in a sensible, operating context.

It is certainly worthwhile to attempt a workable definition and a thorough discussion of the term “ validation ”.

In this way, at least a part of the (implicit) ambiguities above outlined could be either avoided or brought in the open for all concerned professionals to see and to be aware of.

---

(\*) All the Fig. are given at the end of the Bulletin.

S'il est possible de mettre au point une définition, l'étape suivante serait alors de mettre au point des moyens pratiques pour valider, dans le sens défini, d'une façon accessible aux utilisateurs de logiciels de barrages.

Il est évident que la « validation » doit être envisagée comme un processus continu étant donné le flot continu de logiciels nouvellement développés, à la fois pour les anciens et les nouveaux problèmes de calcul de barrages.

## 2.5. ASSURANCE QUALITÉ

L'assurance qualité de l'ensemble de la procédure de modélisation est comprise ici au sens limité de « la capacité de répétabilité de l'application particulière » grâce à une documentation complète des données de procédures d'évaluation des matériaux, de la géométrie, des chargements, etc.

De telles procédures ont été développées dans d'autres environnements techniques et en particulier dans l'industrie de l'énergie nucléaire et pourraient être tout à fait aisément transposées à la pratique des ingénieurs de barrages. Ceci n'est pas traité en détail dans ce Bulletin.

## 2.6. CRITÈRES DE VALIDATION

### 2.6.1. Remarques générales

Dans ce qui suit, le besoin d'une définition satisfaisante du terme « validation de logiciel » et des difficultés associées à la procédure de validation des logiciels de calculs de barrage devrait être apparent.

Du point de vue de l'ingénieur praticien, il semble probable qu'une définition formelle et rigoureuse, à supposer qu'elle existe, se révélerait trop abstraite pour être d'une utilité pratique.

Par conséquent, il semble meilleur de définir, de façon pragmatique, ce que seraient les critères à satisfaire pour qu'un logiciel de barrage soit considéré comme valide du point de vue d'un calcul pratique.

Dans cet objectif, les paragraphes suivants sont destinés à distinguer entre les différentes classes de problèmes.

### 2.6.2. Solutions uniques

Certains problèmes peuvent être posés d'une façon telle qu'ils permettent une formulation générale (du traitement mathématique, du problème sous-jacent à la formulation mathématique) qui fonde le logiciel, qui garantit si les données d'entrée sont bien posées et complètes, si la solution existe et si elle est unique.

C'est le cas, par exemple, de l'élasticité linéaire.

Dans ces conditions, le **premier critère de validation** consiste évidemment à contrôler certaines solutions analytiques simples dans des cas de géométrie et de chargement simples.

If a definition can be achieved, then the successive step should be the setting up of practical means to make “validation” (in the defined sense) within practical reach for software users in dam engineering practice.

It is evident that “validation” should be viewed as a nearly continuous process, given the constant flow of newly developed software for both old and new dam analysis problems.

## 2.5. QUALITY ASSURANCE

Quality assurance of the whole modelling process is here intended to convey only the limited meaning of repeatability of the particular application through complete documentation of input, material evaluation procedures, geometry, loading etc.

Such procedures were developed in other technical environments, e.g. the nuclear power industry, and could be quite easily transposed to dam engineering practice. This subject is not dealt with in detail in this Bulletin.

## 2.6. CRITERIA FOR VALIDATION

### 2.6.1. General Remarks

From the foregoing, the need for a satisfactory definition of the term “software validation” and the difficulties involved in the validation process of dam software should be apparent.

From the point of view of the practising dam engineer, it seems likely that a rigorous formal definition – if it could ever be attained – would prove too abstract to be of real use.

It seems better, therefore, to pragmatically assess what should be the desirable criteria to be met in order that dam software can be considered as “validated” for practical analysis.

In order to do so, the following sub-sections are presented so as to distinguish between problems falling under different classifications.

### 2.6.2. Unique Solutions

Some problems can be posed in a way that allows the general formulation (of the mathematical treatment underlying the software under consideration) to guarantee, for well-posed and complete input data, the existence and uniqueness of the solution.

Such is the case, for instance, of linear elastic analyses.

Under such condition, the **first necessary validation criterion** obviously consists in matching some known analytical solutions for simple geometries and loads.

Il faut choisir, si cela est possible, des géométries et des chargements qui ressemblent, même d'une façon approximative, aux problèmes de barrages à traiter. C'est, par exemple, le cas du cylindre épais avec une pression externe, qui ressemble à un arc de barrage-voûte.

Le degré de précision des résultats qui sont obtenus pour ces problèmes simples est également utile pour évaluer les effets de la discrétisation, des arrondis et des troncatures numériques, etc.

**Un second critère** est également nécessaire : le logiciel que l'on analyse doit donner, dans une application plus réaliste à un vrai problème de barrage, des résultats qui sont raisonnablement proches de ceux donnés par d'autres logiciels déjà validés.

Raisonnement proche, dans ce cas, peut signifier de 1 à 2 % jusqu'à 5 à 10 % de différence relative (4).

**Un troisième critère** consiste à comparer les résultats obtenus pour un même barrage mais de différentes façons :

- i) par le logiciel à valider,
- ii) par un essai sur modèle réduit soigné de la situation calculée.

En fonction de la qualité du contrôle du modèle réduit, de l'équipement de laboratoire, des conditions d'essai, cette comparaison devrait conduire à des différences relatives entre les valeurs numériques et expérimentales qui seront de l'ordre de 5 à 20 %.

**Le quatrième critère** consiste en la comparaison des résultats, pour une situation réelle sur prototype, obtenus :

- i) par des mesures réalisées sur le barrage durant une certaine phase de chargement,
- ii) par le logiciel à valider avec les données qui correspondent le mieux à la situation réelle.

Dans le dernier cas, différentes ambiguïtés sont inévitables.

Dans la situation réelle, les effets non-linéaires liés à l'histoire font que l'unicité de la solution est discutable (voir § 2.6.3.). Au mieux, le modèle utilisé est une schématisation idéale.

Une partie au moins du comportement n'est pas connue; le jeu de mesures est en général beaucoup moins complet que ce qui serait nécessaire pour réaliser une comparaison correcte avec les résultats numériques.

Tout cela conduit, pour ce quatrième type de comparaison, à accepter des différences qui peuvent atteindre 10 à 20 % (5).

---

(4) Les niveaux de précision ne sont pas homogènes, par exemple les déplacements calculés sont généralement plus précis que les contraintes calculées. Les différences admissibles doivent donc être faibles pour les déplacements.

(5) Cependant, il serait possible, au moyen d'un ajustement soigné des paramètres intervenant dans le modèle numérique, de rendre proche de zéro la moyenne de telles différences (en prenant un nombre suffisant de points et d'instantanés dans le temps).

En outre, la distribution en fréquence des différences devrait être conforme aux essais statistiques pour une dispersion de Gauss.

If possible, geometries and loads should be selected which resemble, even if vaguely, the dam problem to be treated (for example, a thick cylinder problem with external pressure for arch dams).

The degree of accuracy in the results obtained for these simple problems is also useful in assessing the effects of discretization, numerical round-off and truncation, etc.

A **second criterion** which is also necessary is that the software under consideration should give, for a more realistic dam application, results which are reasonably close to those given by other softwares that have already been "validated".

Here "reasonably close" can mean anything from 1 or 2 % to 5 or 10 % relative discrepancy (4).

A **third criterion** consists in the comparison of results for a same dam but obtained in different ways :

- i) by the software under consideration, and
- ii) by a carefully executed physical model test of the analyzed situation.

Depending upon the quality of control of the physical model construction process, the laboratory equipment, the test conditions etc., this comparison should yield relative discrepancies between numerical and experimental values which could reasonably range from 5 % to 20 %.

A **fourth criterion** consists in the comparison of results for an actual prototype situation, obtained :

- i) by measurements carried out on a dam in a given state of loading;
- ii) by the software under consideration, with the data input matching as closely as possible the actual situation.

In this last case, various ambiguities are unavoidable.

In a real situation, non-linear and hereditary effects will most probably render questionable the uniqueness of the solution (see § 2.6.3.) and, at best, the model used will be an ideal schematization.

At least part of the behaviour will be unknown; the set of measurements will usually be much less complete than those numerical results which are suitable for comparison, etc.

All this means that in this fourth type of comparison relative discrepancies as high as 10 to 20 % will sometimes have to be accepted (5).

---

(4) Consideration should be given to different achievable levels of accuracy : e.g., displacements are generally more accurately calculated than stresses, so the admissible discrepancy for them should be smaller.

(5) However, it should be possible, by careful adjustment of the constitutive parameters of the numerical model, to make the average of such discrepancies (taken over a sufficient number of points, and of time instants in the case of time-extended processes) substantially closer to zero.

Besides, the frequency distribution of discrepancies should meet the statistical tests for casual scatter.



Par ailleurs, le bon sens indique que ce type de comparaison doit être effectué pour un grand nombre de chargements différents pour le même barrage et aussi pour différents barrages. Chacune de ces comparaisons doit conduire à un résultat acceptable.

D'autres exigences sont de nature plus mathématique; elles concernent par exemple la robustesse de l'algorithme, ce qui signifie qu'une petite variation des données à l'entrée ne doit pas conduire à des variations incontrôlables des résultats.

De plus, il est nécessaire de définir les conditions de stabilité et de convergence de l'algorithme, si ce sont des algorithmes qui doivent converger, et le moyen d'estimation des erreurs de discrétisation.

Si ces critères sont satisfaits, peu d'ingénieurs expérimentés continueront d'entretenir des doutes importants à propos de la validation du logiciel.

Cependant, on note qu'en utilisant ce dernier critère, une certaine contamination des phases de validation et de justification, telle qu'elle est définie précédemment, s'est produite.

### **2.6.3. Solutions potentiellement non-unique**

Beaucoup des phénomènes qui influencent le comportement des barrages ne peuvent être facilement représentés par des équations simples, c'est-à-dire, par exemple, les équations d'élasticité ou les équations des écoulements en milieu poreux.

Les géométries sont très complexes avec des comportements qui dépendent des matériaux constitutifs, de l'histoire de leur dépôt ou de leur mise en place, et des effets thermiques, chimiques, hydrauliques, mécaniques, électriques, etc.

L'utilisateur de logiciel de calcul de barrage doit être bien conscient qu'assez souvent, dans le cas des modèles mathématiques non-linéaires, il n'est pas possible d'assurer l'unicité de la solution pour une situation donnée.

En fait, pour certaines catégories de problèmes non-linéaires, spécialement les chargements dynamiques, plusieurs solutions sont possibles et elles dépendent des conditions initiales et des conditions aux limites.

De plus, de telles situations sont tout à fait sensibles aux conditions initiales et de petites variations de celles-ci peuvent conduire à des différences de résultats finaux considérables, de telle sorte qu'il est difficile d'établir une prédiction sûre à long terme.

Le calcul non-linéaire des barrages en remblai est souvent considéré comme particulièrement sensible à l'histoire de la construction.

Le comportement dynamique non-linéaire d'un barrage, spécialement lorsque l'on considère les phénomènes d'impact comme les chocs entre deux plots adjacents, la rupture de poches de cavitation à l'interface entre le barrage et l'eau, etc., peut très bien conduire à des variations appelées « chaotiques », là encore avec une extrême sensibilité aux conditions initiales et à la valeur des paramètres.

Si la connaissance de ces phénomènes fait défaut, les outils de calcul non-linéaire peuvent être mal utilisés.

On the other hand, it also follows from good sense that this fourth comparison should be carried out for a large number of different loading situations of the same dam (and for different dams as well), requiring consistently “good” agreement.

Other requirements are of a more mathematical nature, concerning for example, the “robustness” of the numerical code, noting that small variations in the input parameters should not yield uncontrollably large variations in results.

Moreover, it is necessary to define : the stability and convergence of numerical iterative procedures, if any; the means for estimating discretization errors; etc.

If all of the foregoing criteria are met, no practising, experienced dam engineer would be likely to entertain many doubts about the “validation” of the software.

Notice that by using this criterion a certain contamination of the phases of “validation” and “justification”, as defined above, is incurred.

### **2.6.3. Potentially Non-unique Solutions**

Many of the phenomena which influence the behaviour of dams cannot be easily represented by simple equations, i.e. by the equations of elasticity or by the equations of flow in porous material.

Geometries are highly complex, with behavior depending upon constituents, history of deposit or pouring, and thermal, chemical, hydraulic, mechanical and electrical effects, etc.

The user of dam analysis software should be aware that, in the case of non-linear mathematical models, quite often it is not possible to assure the uniqueness of the solution for a given situation.

In fact, for certain categories of non-linear problem – especially dynamic loadings – multiple solutions are possible, depending on initial and boundary conditions.

Moreover, such situations can be quite sensitive to initial conditions, and small variations of these can yield dramatically different final results, thus making it very difficult to build up reliable long-term predictions.

The case of non-linear fill dam analyses is often quoted as an instance of critical sensitivity to load path history.

Non-linear dynamic behaviour of dam, especially when considering impact phenomena such as shocks between adjacent blocks, collapse of cavitation pockets at the water-dam interface, etc., could well display so-called “chaotic” variations, again with extreme sensitivity to initial conditions and parameters values.

Without this knowledge, numerical non-linear analysis tools could be wrongly used.

En employant les mêmes approches que pour les modèles linéaires, on risque de nourrir un faux sentiment de confiance dans les résultats alors que dans la réalité le comportement peut être complètement différent de la prédiction du modèle mathématique non-linéaire.

Ceci rend difficile la tâche de « validation » des logiciels comportant des algorithmes non-linéaires et augmente les difficultés inhérentes à un bon usage de ces logiciels.

## 2.7. PHÉNOMÈNES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

### 2.7.1. Remarques générales

Nous arrivons maintenant à la discussion concernant les facteurs et les phénomènes qui doivent être considérés comme importants dans le calcul des barrages.

Ces facteurs doivent être pris en considération dans une validation vraiment complète en fonction des hypothèses faites dans le calcul.

La classification suivante propose les facteurs importants de la procédure de calcul des barrages.

- 1) la géométrie incluant les effets des méthodes de construction, par exemple les joints,
- 2) les conditions aux limites,
- 3) le comportement des matériaux,
- 4) les charges statiques,
- 5) les charges dynamiques,
- 6) Les écoulements et l'analyse couplée hydraulique/mécanique.

**Géométrie :** il est de pratique courante que les barrages soient analysés comme des milieux bi ou tridimensionnels suivant le profil de la vallée, les logiciels disponibles et les contraintes de coût. Les barrages-voûtes doivent être analysés en trois dimensions, mais, dans le cas des barrages en remblai et des barrages-poids, l'ingénieur est souvent en face d'un choix. Il est important d'assurer la validation de ces différents facteurs.

**Conditions aux limites :** elles diffèrent selon le type de barrage, mais l'utilisation de conditions aux limites complexes peut avoir une influence significative sur le résultat obtenu et est une part importante des facteurs à prendre en considération pour certaines validations.

**Propriétés des matériaux :** ils diffèrent selon le type de barrage, voir sous-paragraphe plus bas. On n'insistera jamais assez sur l'importance du choix d'une bonne loi de comportement.

Dans le cas où un modèle de comportement non-linéaire est utilisé, il est important que toute la procédure de calcul incluant la procédure de modélisation et de résolution soit correctement validée pour les différentes conditions, pour les différents aspects des caractéristiques phénoménologiques connues.

By employing the same approach as for linear models, a false sense of confidence in the results could be accrued, while in reality the behaviour could be completely divergent from particular predictions of the non-linear mathematical model.

All this evidently makes the task of “validation” for non-linear dam analysis software all the more difficult, as well as enhancing the difficulties inherent in the sound practical use of such software.

## 2.7. PHENOMENA AND MODELLING ASSUMPTIONS

### 2.7.1. General Remarks

We now turn to a discussion of the factors and phenomena which are considered to be of importance in dam analysis.

Those factors should be given consideration in a fully comprehensive validation, according to the assumptions made in the analysis.

The following classification is now suggested for important factors affecting the analysis process :

- 1) geometry, including effects of construction methods (e.g. joints),
- 2) boundary conditions,
- 3) material behaviour,
- 4) static loadings,
- 5) dynamic loadings,
- 6) seepage and coupled analysis.

**Geometry :** It is current practice that dams may be analysed as either two or three- dimensional continua, according to valley profile, available computer code and cost constraint. Arch dams must be analysed in 3D, but in the case of embankments or gravity types the engineer is often faced with a choice. It is thus important to perform validations for these different options.

**Boundary conditions :** they differ according to the dam type, but the use of complex boundary conditions can have a significant influence on the results obtained, and should form an important consideration for certain validations.

**Material behaviour :** it differs according to the dam type (see subsections below) but the importance of correct modelling cannot be over-emphasised.

In the case where non-linear material modelling is employed, it is important that the whole analytical process, including the model and solution procedure, be adequately validated for the different conditions pertaining to the known phenomenological characteristics.

**Charges statiques :** dans tous les cas, l'utilisation des charges statiques correspondant à la retenue normale doit être analysée, de même que les chargements correspondant au niveau atteint pendant les crues. Pour certaines parties de structure, des niveaux de remplissage partiel peuvent produire des conditions défavorables.

Dans le cas des barrages en béton, les effets de variation de la température ambiante, soit permanente ou cyclique, doivent constituer l'un des cas de charge de la validation. Il est recommandé de le faire pour les conditions extrêmes.

Pour les barrages en béton compacté au rouleau, l'influence de la chaleur d'hydratation joue un rôle majeur dans le risque de fissuration. Pour de telles structures, cet effet doit aussi être considéré dans les tests de validation.

**Chargements dynamiques :** il s'agit principalement des chargements sismiques.

Comme il est convenu d'utiliser des critères de projets différents pour le séisme de fonctionnement et le séisme maximal probable, les deux cas doivent être considérés dans la validation afin de déterminer quand le modèle non-linéaire doit être utilisé.

Dans le cas de l'analyse linéaire, la grandeur du chargement est évidemment sans importance puisque le résultat est proportionnel au niveau d'accélération.

**Écoulement et analyse couplée :** elle est très importante pour tous les barrages.

Pour les barrages en béton, l'effet de l'écoulement à l'intérieur du rocher de la fondation doit constituer une solution de banc d'essai, avec la possibilité de spécifier les conditions d'écoulement comme une fonction des contraintes effectives et de l'épaisseur des fissures à l'intérieur du béton ou du rocher de la fondation.

Pour les remblais, l'effet de l'écoulement à travers le remblai, ainsi qu'à travers la fondation, est très important pour la validation.

## **2.7.2. Phénomènes spécifiques aux barrages en béton**

Les phénomènes spécifiques aux barrages en béton sont principalement les suivants :

- comportement du béton et de la roche de la fondation associée (influence sur le modèle de comportement des matériaux employé dans le calcul),
- phénomènes et paramètres affectant la réponse en champ proche du barrage et de la fondation durant le chargement sismique en incluant les effets de l'interaction fluide-structure et de la propagation des ondes dans la fondation rocheuse,
- l'interaction des éléments structurels différents, comme par exemple la séparation et le contact des différents plots de construction du fait des conditions de contraintes défavorables de l'histoire du chargement.

Les modèles de comportement des matériaux doivent inclure :

- la modélisation du fluage,
- la modélisation de la fissuration, de la fracturation, de la localisation et de la propagation d'une fissure,

**Static loadings :** in all cases, the usual hydrostatic loading due to normal maximum storage elevation should be analysed, as well as the unusual loading due to flood storage level. For some parts of the structure, partial impoundment levels can produce the most unfavourable conditions.

In the case of concrete dams, the effects of variations in ambient temperature, either steady-state or cyclic, should constitute a validation load case, and mean maximum conditions are recommended.

For roller-compacted-concrete, the influence of the heat of hydration plays a major role in the potential for cracking, and for such structures this effect should also be considered as a validation case.

**Dynamic loadings :** consist mainly of seismic loadings.

Due to the usual adoption of different design criteria for OBE (Operating Basis Earthquake) and MCE (Maximum Credible Earthquake) conditions, both cases should be considered in a validation for applications where non-linear models are to be used.

In the case of linear analysis, the magnitude of the loading is obviously not important, only the relative results as a function of the load intensity.

**Seepage and coupled analysis :** they are important for all dams.

For concrete dams, the effect of seepage within the foundation rock should form a benchmark solution, with the possibility of specifying the seepage conditions as a function of the effective stress (and crack openings) within fractured rock foundations.

For embankments, the effect of seepage within the embankment, as well as within the foundation, is of importance for validation.

## 2.7.2. Phenomena Specific to Concrete Dams

The phenomena specific to concrete dams relate mainly to :

- behaviour of the concrete and associated rock foundation materials (influencing the material models employed in the analysis),
- phenomena and parameters affecting the near-field response of the dam and foundation during seismic loading, including the effects of fluid-structure interaction and wave propagation within the foundation domain, and
- the interaction of separate structural elements, such as the separation and impact of various construction blocks due to unfavourable stress conditions or loading history.

Material models should include :

- modelling of creep,
- modelling of cracking, fracturing, localization and propagation of a fissure,

- la modélisation des joints dans le rocher.

De plus, les points suivants doivent faire l'objet d'une attention spéciale :

- modélisation des conditions aux limites, des écoulements, des contacts, des ouvertures et fermetures des joints, de la dilatance, des pressions d'injection, etc.,
- modélisation des armatures, des armatures passives et des armatures de précontrainte, etc.

### **2.7.3. Phénomènes spécifiques aux barrages en remblai**

Les phénomènes spécifiques aux barrages en remblai sont principalement :

- le comportement du noyau, des filtres, des recharges et des matériaux de la fondation associée (influençant le modèle de comportement prévu dans le calcul),
- le couplage entre le sol et le fluide, en particulier en ce qui concerne le potentiel de liquéfaction et la fracturation hydraulique,
- la consolidation et l'érosion interne.

Les modèles de comportement des matériaux doivent inclure :

- la modélisation du comportement élasto-plastique et du comportement cyclique des sols en prenant en compte la consolidation, la consolidation secondaire, la dilatance, l'écrouissage et l'amortissement en fonction de la déformation cyclique, etc.,
- la modélisation de la fissure, de la fracturation, de la localisation et de la propagation de la fissure,
- la modélisation de l'effet de l'eau, en condition saturée et non saturée.

La modélisation des phases de construction qui montre l'influence de l'histoire de la construction est aussi importante pour les remblais et doit être incluse dans les validations.

### **2.7.4. Remarques sur la détermination des données**

Définition des données disponibles :

- essais de laboratoire et définition des procédures d'essai permettant d'obtenir les paramètres des modèles de comportement,
- essais *in situ*,
- caractéristiques : placement, teneur en eau, compactage, vibration, température, etc. pour les barrages en béton; granulométrie, limite de liquidité, indice de plasticité, densité sèche, perméabilité pour les barrages en remblai.

- modelling of jointed rock.

In addition, the following should be given special consideration :

- modelling of complex boundary conditions, seepage, contact, opening-closing of joints, dilatance, grouting pressure, etc.
- modelling of reinforcement elements, passive steel reinforcement, prestressing, etc.

### **2.7.3. Phenomena Specific to Embankment Dams**

The phenomena specific to embankment dams relate mainly to :

- behaviour of the core, filter and shell and the associated foundation materials (influencing the material models employed in the analysis),
- coupling between the soil and fluid, particularly in respect to liquefaction potential and hydraulic fracture,
- consolidation, piping.

Material models should include :

- modelling elastic-plastic and cyclic behaviour of soils, taking into account consolidation, over-consolidation, dilatance and hardening, and damping as a function of cyclic strains, etc.,
- modelling of cracking, fracturing, localization and propagation of a fissure,
- modelling of the effect of water, in saturated and unsaturated condition.

The modelling of the construction phases to show the influence of the construction history is also important for embankments, and should be included in validations.

### **2.7.4. Remarks on Data Determination**

Definition of available data :

- laboratory tests and definition of tests procedures to determine the parameters of the behaviour models,
- *in situ* tests,
- characteristics : placing, water content, compaction, vibration, temperature, etc. for concrete dams; grain-size distribution, liquid limit, plasticity index, dry density, permeability for embankment dams.



### **2.7.5. Remarques sur les résultats attendus**

La définition des résultats attendus du logiciel inclut :

- déplacements, déformation élastique, déformation plastique, état du matériau sur un diagramme  $(p, q)$  ou équivalent, pression interstitielle, contraintes effectives dans tout ou partie du barrage,
- résultante en terme d'efforts ou de flux sur les lignes ou surfaces à l'intérieur ou aux frontières du barrage.

### **2.7.5. Remarks on Expected Results**

Definition of results expected from the numerical analysis code include :

- displacement, elastic strain, plastic strain, condition of material on a chart (p, q) or similar, pore pressure, effective stresses on all or part of the dam,
- resultant in terms of effort or flux on lines or surfaces inside or at the boundaries of the dam.

---

### 3. CONCEPT D'ATELIER DE BANC D'ESSAI

---

Nous avons maintenant à définir la procédure pratique qui permette à un utilisateur de logiciel de barrage d'être assuré de la validité du logiciel au sens discuté dans les paragraphes précédents.

Ces logiciels ont jusqu'à présent été fréquemment développés en « interne » et ne sont pas livrés avec une validation documentée au sens défini ci-dessus.

Par ailleurs, il est assez fréquent dans quelques associations scientifiques ou techniques internationales (par exemple le RILEM) de tenir de temps en temps des ateliers de bancs d'essais sur un thème donné.

Cela signifie en pratique qu'une situation donnée (par exemple dans le domaine de la mécanique de la fracturation) est définie aussi complètement que possible et que les participants au banc d'essai doivent analyser cette situation avec un outil de calcul de leur choix.

Les résultats sont alors comparés publiquement et discutés avec l'aide, à chaque fois que cela est possible, de données expérimentales dignes de confiance.

A la fin, si le banc d'essai est réussi, une « solution de référence » acceptée est publiée (éventuellement avec une bande d'incertitude).

Les codes de calcul qui sont capables de calculer la « solution de référence » sont considérés comme « valides » pour ce type de problème.

Il semble possible, sans rencontrer de grandes difficultés, d'adopter une stratégie similaire pour chacun des différents problèmes typiques qui sont intéressants pour l'ingénieur praticien et qui peuvent être formulés comme des problèmes analytiques.

Supposons qu'il soit possible en principe, pour chacun de ces problèmes, de définir une application particulière et de tenir un banc d'essai spécialisé dans lequel chacun des participants apporterait la solution obtenue avec le logiciel de son choix.

Les différentes solutions seraient comparées et discutées. Si des données expérimentales provenant de modèles réduits ou de l'auscultation des barrages en service sont disponibles, elles peuvent être utilisées pour montrer que la solution est correcte.

A la fin, un panel scientifique fait la synthèse des résultats du banc d'essai et, si cela est possible, publie la solution de référence pour ces problèmes, précise les bandes d'incertitudes et l'accompagne de commentaires critiques.

Après un certain temps, un ensemble de solutions de référence serait disponible pour les professionnels de barrages, de façon à être utilisé comme des jalons permettant de valider les logiciels qui ne l'ont pas encore été pour les problèmes en question, ou un logiciel qui a été validé mais qui a été modifié ultérieurement.

---

### 3. CONCEPT OF BENCHMARK-WORKSHOPS

---

We are now faced with the practical process of how a user of dam-analysis software can be assured of the validity of software in the sense discussed in the preceding sections.

Dam analysis software has, up to now, often been developed “in-house” and does not usually come with a documented validation of the kind defined above.

On the other hand, it is quite customary in some international technical/scientific associations (for example RILEM, ...) to hold from time to time computational Benchmark-Workshops on a given theme.

This means in practice that a given situation (for example, in the field of Fracture Mechanics) is defined as completely as possible and participants to the B.-W. are required to analyse this situation with a computational tool of their choice.

The results are then publicly compared and discussed, with the help, whenever possible, of a reliable set of experimental data.

At the end, if the B.-W. is successful, an accepted “reference solution” is published (possibly with a band of uncertainty).

Those computer codes that are able to meet the “reference solution” are considered as “validated” for that kind of problem.

It seems possible – notwithstanding much greater difficulties – to adopt a similar strategy for each one of the different “typical” problems which are of interest to practising dam engineers and which can be formulated as analytical problems.

Let us assume that it is possible in principle, for each of those problems, to define a particular application and to hold a specialised B.-W., in which each of the participants would bring the solution obtained from the software of their choice.

The different solutions would be compared and discussed. If reliable experimental data (from physical models or from in-service dam monitoring) were available, these could be utilized in assessing the “correctness” of the solutions.

At the end, a Scientific Panel would synthesize the results of the B.-W. and, if possible, publish a “reference solution” for that problem, complete of uncertainty bands and accompanied by critical comments.

After a time, a collection of reference solutions would be available to dam professionals, to be used as yardsticks against which to assess softwares that have not yet been “validated” for the required problems, or a software that was validated but has been subsequently modified.

Il semble qu'une telle tâche (concevoir, organiser et réaliser des bancs d'essai comme décrits ci-dessus) est une mission à long terme idéale pour le Comité CIGB des méthodes de calcul des barrages.

Bien sûr, cela ne peut être possible que si certaines conditions sont satisfaites. La première est que le Comité ci-dessus devienne un Comité standard avec la mission à long terme décrite ci-dessus qui constituerait le cahier des charges permanent de ce Comité. Le changement de président et des membres du Comité ne doit pas stopper l'effort qui doit s'étendre sur de nombreuses années à partir de maintenant.

Les bancs d'essai doivent être tenus régulièrement sous l'égide de la CIGB.

A la fin de chaque banc d'essai, le Comité (avec l'aide d'experts extérieurs si cela est nécessaire) prendra sur lui de produire le rapport de synthèse incluant la solution de référence. Cela pourra très bien prendre la forme d'un bulletin CIGB à la disposition de tous les ingénieurs de barrages qui sont chargés de calculs informatiques.

Il nous semble que de cette façon, la CIGB rendrait un service signalé à toute la profession en l'aidant à aborder de façon satisfaisante toutes les activités relatives aux calculs des barrages et cela avec une compétence et une connaissance de l'état de l'art correcte.

It would seem that such a task (conceiving, organizing and carrying out B.-W.s of the kind just described) is an ideal long-term mission for the ICOLD Committee on Computational Aspects of Dam Analysis and Design.

Of course, this would be possible only provided certain conditions are met. First of all, the above-cited ad hoc ICOLD Committee should become a full-fledged Committee, with the above long-term mission constituting a permanent feature of its Terms of Reference. Change of Chairman and of components of the Committee should not terminate the effort, which will be extended over many years to come.

The B.-Workshops should be held regularly with the outside sponsoring of ICOLD.

At the end of each B.-W., the Committee (with the help of some outside expert, if necessary) would take upon itself the task of producing the Synthesis Report, including the Reference Solution. This could well take the form of an ICOLD Bulletin, at the disposal of all dam engineers engaged in computational analysis.

It is felt that in this way ICOLD would render a signal service to the profession, providing a powerful help in approaching all activities related to dam computation with the right background and with state-of-the-art information.

---

## 4. ORGANISATION DES BANC D'ESSAI

---

Il est proposé que les bancs d'essai soient organisés tous les deux ans, considérant, d'une part, le nombre de questions relatives aux calculs des barrages qui sont traités (voir liste dans le paragraphe 5.1.2.) et, d'autre part, le temps et les efforts qui sont nécessaires pour préparer chaque banc d'essai, pour préparer les données et produire le rapport de synthèse.

Le choix d'un intervalle de deux ans entre deux bancs d'essais successifs est le résultat de l'expérience.

En fait, les deux premiers Benchmarks se sont tenus à un an d'intervalle, mais cela s'est révélé beaucoup trop court. D'autre part, un intervalle supérieur à deux ans pourrait excessivement ralentir le processus.

La responsabilité technique et scientifique est du ressort du Comité des méthodes de calcul des barrages de la CIGB. Les bancs d'essai doivent être autofinancés par le biais d'une participation financière satisfaisante, de façon à ne pas imposer un engagement financier à la CIGB.

Le Comité de la CIGB cité ci-dessus doit trouver pour chacune des occasions l'aide d'une institution scientifique compétente pour organiser et accueillir matériellement le banc d'essai.

Suivant la politique générale de la CIGB, le banc d'essai doit être organisé si possible chaque fois dans un pays-membre différent pourvu qu'un organisateur approprié se soit proposé.

Il va s'en dire que la CIGB doit soutenir officiellement le banc d'essai, ce qui veut dire que la CIGB endosse l'objectif scientifique des bancs d'essai. Cela suppose aussi que si le banc d'essai est réussi, c'est-à-dire si un rapport final peut être produit avec des conclusions bien structurées et d'un usage pratique pour la profession, la CIGB assurera l'édition de ces rapports finaux, soit comme bulletin, soit d'une quelconque autre manière qui lui apparaîtrait satisfaisante.

Les logiciels qui seront testés et comparés dans les bancs d'essai trouveront éventuellement leur application dans les procédures de dimensionnement des nouveaux barrages (ou dans l'analyse des barrages existants).

Il faut cependant être extrêmement clair sur le fait que les thèmes de ces bancs d'essai ne reflètent pas nécessairement des procédures de projet.

Il peut être parfois plus adapté de définir des cas d'essais qui sont plus simples et mieux définis que ne le sont habituellement les problèmes de projet.

---

## 4. ORGANIZATION OF BENCHMARK-WORKSHOPS

---

It is proposed that a B.W.'s could be organized on a biennial basis, considering on one hand the number of computational dam questions to be faced (see list in section 5.1.2.) and on the other hand the time and effort involved in :

- preparing each B.-W.,
- processing the data and issuing a Synthesis Report.

The adoption of a two- year interval between successive B.W.'s is suggested as a result of experience.

In fact, the first two B.W.'s were held at one year's interval from each other, and this proved to be excessively short. On the other hand, a longer interval would slow too much the pace of achievement.

The technical/scientific responsibility would fall to the ICOLD Committee for Computational Problems of Dam Analysis and Design.

The B.-W.s should be self-financing through the establishment of a suitable participation fee, so as not to impose any financial commitments on ICOLD.

The above-cited ICOLD Committee should seek, on each occasion, the help of a competent scientific institution to organize and materially host the B.-W.

Adhering to the general policies of ICOLD, the B.-W.s should preferably be held each time in a different member country, provided a proper local organizer can be found.

It goes without saying that ICOLD should officially sponsor the B.-W.s, this meaning that ICOLD endorses the scientific purpose of the B.-W.s. It is also implied that, if the B.-W. is successful, i.e. if a Final Report can be issued with well-structured conclusions of practical use to the profession, ICOLD will consider issuing these Final Reports (either as Bulletins or in such other official form as it might appear proper to do).

The softwares that will be tested and compared in the B.-W.s will eventually find their way into the design process of new dams (or in the analysis of existing dams).

It should, however, be extremely clear that the themes of the B.-W.s will not necessarily reflect design procedures.

Indeed, sometimes it may be more convenient to define Benchmark cases that are simpler, or better defined, than some design cases usually are.



On doit garder à l'esprit que l'objectif final de l'entreprise est la validation des logiciels et non la discussion ou la simulation des procédures de projet. Ces derniers points sont couverts par d'autres types d'organismes professionnels.

Par ailleurs, il apparaît recommandable, quand cela est possible, de choisir les barrages spécifiques analysés durant les bancs d'essai, parmi les structures qui ont été analysées de façon très complète en pratique, soit sur le terrain, soit par le biais de modèle réduit. De cette façon, au moins de temps en temps, une comparaison pourra être établie entre le comportement réel du barrage, tel qu'il ressort des mesures expérimentales, et le comportement tel qu'il peut être numériquement simulé par au moins quelques-uns des logiciels participant aux bancs d'essai.

Une fois de plus, il doit être clairement compris que ce type de comparaison ne sera pas toujours possible et aussi qu'il ne coïncide pas nécessairement avec l'un des sujets proposés pour la participation au banc d'essai.

Par exemple, trop de données devraient être fournies pour une simulation détaillée d'un comportement réel.

Cependant, supposons qu'au moins l'un des participants puisse présenter une bonne simulation numérique d'un comportement réel, et que le logiciel utilisé pour cette simulation a aussi simulé correctement le test du banc d'essai officiel.

On peut penser que, dans ce cas, le bon accord démontré entre les valeurs calculées et observées donnera un sentiment de confiance renforcée à la fois pour le projet et pour le calcul en ce qui concerne la représentativité du modèle numérique testé. De cette façon, on assure en même temps une justification partielle du modèle utilisé (voir 2.3.).

Le rapport de synthèse doit contenir une présentation concise des logiciels utilisés par les participants et une comparaison soignée des résultats (déplacements-contraintes) en des points bien sélectionnés, situés dans la structure et/ou dans la fondation.

Il est prévu qu'au moins dans beaucoup de cas la comparaison montrera que l'ensemble ou la plupart des résultats individuels est inclus dans une bande raisonnablement étroite.

Cela définira une solution de référence officielle et un intervalle de confiance que le Comité de la CIGB exprimera et inclura dans le rapport de synthèse.

En conséquence, les professionnels qui souhaiteront tester un logiciel destiné à résoudre des problèmes de barrages similaires à un thème des bancs d'essais pourront, par référence au rapport de synthèse correspondant, exécuter le logiciel en question avec l'ensemble des données fournies et comparer les résultats ainsi obtenus avec la solution officielle de référence. Une conclusion positive de la comparaison ne donnera bien sûr pas une garantie absolue que le logiciel testé est correct.

En revanche, toute différence substantielle des résultats par rapport à la solution officielle de référence alertera l'utilisateur, soit d'un possible dysfonctionnement, soit d'une erreur dans le logiciel.

It should be kept in mind, in this connection, that the real purpose of the whole enterprise is the validation of software and not the discussion or the stimulation of design procedures. The latter are indeed, covered by different professional events.

On the other hand, it appears advisable, whenever feasible, to choose the specific dams to be analysed in the B.W.'s from amongst those structures that have been thoroughly investigated in practice, either in the field or by means of physical models. In this way, at least sometimes, a comparison could be attempted between the actual behaviour of the dam (as known through experimental measurements) and the behaviour as it can be numerically simulated by at least some of the computer codes participating in the B.-W.

Again, it should be clearly understood that this kind of comparison will not always be possible, and also that it will not necessarily coincide with one of the topics proposed for participation in the benchmark.

For example, too much data would have to be processed for detailed simulation of actual behaviour.

However, suppose that at least one of the participants can present a good case of numerical simulation of actual behaviour, and that the software used for this simulation also passes the test of the official benchmark.

It is felt that in this case the demonstrated agreement between computed and observed values will give an added feeling of confidence, for design and analysis purposes, in the representativeness of the numerical models tested. A partial "justification" of the model used, see § 2.3., would thus be achieved.

The Synthesis Report should contain a concise presentation of the software codes used by the participants and a careful comparison of results (displacements, stresses, etc.) in a pre-selected array of points situated in the structure and/or in the foundation.

It is anticipated that, at least in many cases, the comparison will show a reasonably narrow "band" in which all or most of the individual results are included.

This will define an "official reference solution" and an "interval of confidence" that the ICOLD Committee will work out and include in the Synthesis Report.

Subsequently, professionals wishing to test a given software package intended for use in a dam problem which is similar to the theme of the B.-W., will have the option, by referring to the relevant Synthesis Report, of running the software in question with the given set of input data and to compare the results thus obtained with the "official reference solution". A positive conclusion of the comparison, of course, will not give a firm guarantee of correctness of the tested software.

By contrast, any substantial deviation of results from the "official reference solution" will alert the user to possible malfunctions or errors in the software.

Il est tout à fait possible que dans le cas de quelques-uns des problèmes de pointe posés lors d'un banc d'essai, il y ait un accord insuffisant entre les différents résultats.

Dans ce cas, il ne sera pas possible de définir une solution officielle de référence, mais néanmoins l'effort n'aura pas été vain.

En fait, on aura dans ce cas identifié un problème de barrage typique qui n'est pas encore raisonnablement accessible aux analyses de routine et pour lequel des efforts de recherche futurs sont nécessaires (en ce qui concerne les techniques numériques et/ou le champ des investigations expérimentales).

En d'autres termes, les difficultés rencontrées dans un tel cas permettront de localiser les domaines de connaissance insuffisante ou de faiblesses des algorithmes mathématiques de façon à orienter et à faciliter les recherches dans les champs d'activités correspondants.

It is quite possible that in the case of some of the more advanced problems posed for a B.-W. there will be insufficient agreement between different results.

In this case, it will not be possible to define an “official reference solution”, but nonetheless an important conclusion will have been reached.

In fact, one would in this case identify a typical dam problem which is not yet amenable to “routine” analyses, and for which further research efforts are warranted (both in numerical techniques and/or in experimental investigation).

In other words, the difficulties met with in this case will help to pin-point areas of insufficient knowledge, or of mathematical modelling shortcomings, thus orienting and facilitating the advancements in the relevant field.

---

## 5. THÈMES PROPOSÉS AUX BANCS D'ESSAI

---

### 5.1. CATÉGORIES PROPOSÉES POUR LES BANCS D'ESSAI

#### 5.1.1. Catégories des bancs d'essai standards

Les catégories générales suivantes sont proposées de façon à distinguer entre les différents types de calcul de barrages.

Catégorie 1 : analyse linéaire avec une méthode de résolution précise.

Catégorie 2 : analyse avec des lois de comportement non-linéaire simplifié.

Catégorie 3 : calcul complexe avec des lois de comportement nécessitant des données caractéristiques des matériaux supplémentaires.

#### 5.1.2. Cas à traiter dans les bancs d'essai

Ils peuvent être obtenus par combinaison des cas suivants, selon ce que le comité organisateur juge approprié.

##### 1) Barrages en béton

###### 1.1. Analyse bi-dimensionnelle

Ceci inclut les barrages-poids et les barrages en béton compacté au rouleau rectilignes.

Pour le calcul, il y a une très petite différence entre ces deux types de barrages, sauf que le scénario de construction et le chargement thermique sont plus critiques pour les barrages en béton compacté au rouleau, dépourvus de joints, que pour les barrages en béton traditionnel.

Les cas à considérer sont les suivants :

1.1.1. Solution élastique tenant compte du scénario de construction (incluant les effets thermiques) et les chargements thermiques saisonniers (Cat. 1).

1.1.2. Gonflement et retrait du béton dus aux effets associés à la mise en eau du réservoir, autres que la charge hydrostatique sur la face amont du barrage (Cat. 2).

1.1.3. Comportement non-linéaire du béton et du rocher de la fondation incluant la fracturation (Cat. 3).

1.1.4. Réponse en fréquence (Cat. 1).

1.1.5. Réponse linéaire en temps (Cat. 1).

---

## 5. PROPOSED WORKSHOP-BENCHMARK THEMES

---

### 5.1. PROPOSED BENCHMARK CATEGORIES

#### 5.1.1. Standard Benchmark Categories

The following general categories are proposed in order to distinguish the various types of analysis to be performed for dams :

Category 1 : Widespread linear analysis with an accurate solution method.

Category 2 : Analysis with simplified nonlinear material law.

Category 3 : Complex analysis with advanced material laws, needing additional material data.

#### 5.1.2. Benchmark Cases

Benchmark cases may be derived as combinations of the following cases as considered appropriate by the organizing committee.

##### 1) Concrete Dams

###### 1.1. Two Dimensional Analysis

This includes most straight gravity dams and RCC dams.

For analysis, there is very little difference between these two types of dams except that construction sequence and thermal loading are more critical for jointless RCC dam than for classical concrete dams.

Cases to be considered consist of the following :

1.1.1. Elastic solution considering construction sequence (including thermal effects) and seasonal thermal loading (Cat. 1).

1.1.2. Concrete swelling/settlement due to reservoir impoundment effects other than hydrostatic load on upstream dam face (Cat. 2).

1.1.3. Concrete/foundation non linear behaviour including fracture (Cat. 3).

1.1.4. Frequency response (Cat. 1).

1.1.5. Time history linear analysis (Cat. 1).

1.1.6. Réponse non-linéaire en temps incluant la fissuration du barrage ou de la fondation (Cat. 3).

## 1.2. Analyse tridimensionnelle

Ce groupe inclut tous les types de barrages-voûtes, c'est-à-dire à la fois les barrages-voûtes épais et minces et les barrages-voûtes à simple et à double courbure. Il inclut aussi les barrages-poids voûtes, les barrages à contreforts et certains barrages-poids pour lesquels le comportement tridimensionnel est important. Les cas à considérer sont :

1.2.1. Chargement thermique, effet de l'eau et poids propre avec prise en compte du scénario de construction (Cat. 1).

1.2.2. Réponse en fréquence (Cat. 1).

1.2.3. Réponse linéaire élastique en temps (Cat. 1).

1.2.4. Écoulement (Cat. 2).

1.2.5. Analyse statique non-linéaire avec ou sans fissuration du barrage et de la fondation (Cat. 2 ou 3).

1.2.6. Calcul dynamique avec l'effet de la fissuration du béton dans la fondation et/ou l'ouverture des joints (Cat. 3).

1.2.7. Mouvement de la fondation (Cat. 3).

1.2.8. Fluage, retrait, gonflement (Cat. 3).

## 2) Barrages en remblai

Ce groupe inclut les barrages en remblai avec noyau argileux, noyau en béton bitumineux, masque en béton de ciment, masque en béton bitumineux, et les barrages en enrochement armé.

Il inclut aussi les structures avec des interfaces de contact entre le remblai et le béton.

### 2.1. Cas tests

2.1.1. Écoulement (Cat. 1).

2.1.2. Construction/mise en eau = élastique par morceau (Cat. 2).

2.1.3. Construction/mise en eau = non-linéaire (Cat. 3).

2.1.4. Fracturation hydraulique (Cat. 3).

2.1.5. Analyse dynamique non-linéaire (Cat. 3).

2.1.6. Calcul couplé avec consolidation (Cat. 3).

2.1.7. Calcul couplé avec écoulement, contrainte effective et saturation partielle (Cat. 3).

2.1.8. Processus d'érosion interne (Cat. 3).

1.1.6. Time history non linear analysis including dam or foundation fracture (Cat. 3).

## 1.2. Three Dimensional Analysis

This group includes all types of arch dams, i.e both thick and thin arch dams and both single and double curvature arch dams. It also include arch gravity dams, buttress dams and certain gravity dams for wich three-dimensional behaviour is important. Cases to be considered are :

1.2.1. Thermal loading, water load and selfweight considering construction sequence (Cat. 1).

1.2.2. Frequency analysis (Cat. 1).

1.2.3. Linear elastic time history analysis (Cat. 1).

1.2.4. Seepage (Cat. 2).

1.2.5. Static non linear analysis with or without dam or foundation fracture (Cat. 2 or 3).

1.2.6. Dynamic analysis with dam or foundation fracture and/or joint opening (Cat. 3).

1.2.7. Foundation movement (Cat. 3).

1.2.8. Creep/shrinkage/swelling (Cat. 3).

## 2) Embankment Dams

These include clay core, asphaltic concrete core, concrete face, asphaltic face embankment dams and reinforced rockfill dams.

Also included are structures with concrete-fill interface.

### 2.1. Benchmark Cases

2.1.1. Seepage (Cat. 1).

2.1.2. Construction/impounding = piecewise elastic (Cat. 2).

2.1.3. Construction/impounding = nonlinear (Cat. 3).

2.1.4. Hydraulic fracture (Cat. 3).

2.1.5. Nonlinear dynamic analysis (Cat. 3).

2.1.6. Coupled consolidation (Cat. 3).

2.1.7 Coupled seepage/stress/partial saturation (Cat. 3).

2.1.8. Erosion processes (Cat. 3).



### **3) Remarques**

Les catégories de tests et les cas cités ci-dessus sont proposés comme références futures.

Il est admis que de nouveaux cas pourront être développés plus tard. L'importance relative de chaque cas pourra changer dans le futur.

Les thèmes exacts des futurs bancs d'essai seront déterminés par le comité d'organisation.

## **5.2. EXEMPLES DE BANCS D'ESSAI EXEMPLE TYPE POUR UN ATELIER DE BANC D'ESSAI**

### **5.2.1. Discussion préliminaire**

Comme on l'a déjà montré dans le rapport, les bancs d'essai sont utiles pour établir les procédures par lesquelles le logiciel peut être validé.

L'usage de l'ordinateur pour le calcul des barrages est relativement récent. Son introduction est plutôt récente dans ce domaine d'activité, si on le compare avec d'autres disciplines comme l'aéronautique.

C'est pourquoi l'utilisation de logiciels pour le calcul des barrages ne peut être considérée comme étant confortée. L'utilité des comparaisons de résultats de différents logiciels et de différentes expériences est de ce fait évidente.

A partir de ces comparaisons, il doit être possible d'identifier un champ acceptable pour les solutions fournies par chacun des logiciels pour le problème donné.

En d'autres termes, il doit être possible de valider chaque code au moins pour une application d'un champ spécifique.

Ce chapitre expose certaines des raisons qui ont conduit au programme du premier banc d'essai organisé par le Comité CIGB des méthodes de calcul, qui s'est tenu à Bergame, en Italie, à la fin mai 1991.

Le Comité avait décidé de présenter deux thèmes pour le premier banc d'essai relatif à l'analyse linéaire des barrages en béton qui est assez simple d'une part, et à une analyse non-linéaire plus complexe d'un barrage en remblai d'autre part.

En faisant cela, on espérait que des progrès rapides pourraient être accomplis pour la solution du cas élastique et qu'en même temps on gagnerait en expérience pour le cas non-linéaire, ce qui pourrait servir de guide pour les bancs d'essai sur des sujets plus avancés.

Les méthodes de calcul pour les barrages en béton, par exemple les barrages-voûtes et notamment les barrages-poids voûtes, sont nombreuses même si la méthode des éléments finis est devenue la plus utilisée.

Cependant, il reste nécessaire de réaliser une comparaison à la fois entre les différentes méthodes et entre les différents développements sous forme de logiciels.

### **3) Remarks**

Above-cited benchmark categories and cases are proposed for future reference.

It is recognized that new cases may develop with time. The relative importance of each case will change in the future.

The exact themes of future benchmark workshops shall be determined by the organizing committee.

## **5.2. BENCHMARK EXAMPLES EXAMPLE FORMAT FOR A BENCHMARK-WORKSHOP**

### **5.2.1. Preliminary Discussion**

As already shown in the report, benchmark-workshops are useful for setting standards whereby computer programs can be validated.

Computer use for dam analysis is comparatively new, due to rather recent introduction in this field as compared with other disciplines, like aeronautics.

For this reason the use of computational codes for dam analysis cannot yet be considered to be consolidated and thus the usefulness of comparisons of results from different programs and expertise is evident.

From these comparisons it should be possible to identify an acceptability range for the solution provided by each single computational code for the given problem.

In other words, it should be possible to validate each code, at least for the specific field of application.

This section discusses some of the reasoning given to the planning of the first B-W organised by the ICOLD *ad hoc* Committee for Computational Aspects of Dam Analysis and Design, which was held in Bergamo, Italy at the end of May, 1991.

The Committee decided to promote two themes for the first workshop, related to a relatively straightforward linear-elastic analysis of a concrete dam, on the one hand, and a more complex non-linear dynamic analysis of an embankment dam, on the other hand.

By so doing, it was hoped that rapid progress could be made with the benchmark solution for the elastic case, whilst also gaining experience, from the nonlinear case, for conducting workshops on more advanced topics.

The computational methods for concrete dams (for example, arch and arch gravity dams) are numerous, even if the finite element method has become the most used.

However, the necessity of a comparison both among different methods and different implementations in computer codes still remains.

Le choix du calcul élastique linéaire était motivé par les raisons suivantes :

1) Dans les barrages en béton, le niveau de contrainte est généralement tel que la structure reste dans le domaine linéaire élastique, à l'exception de zones réduites où le comportement est non-linéaire et qui n'affectent pas le comportement global de la structure. Les calculs élastiques linéaires sont, en conséquence, les plus utilisés par les ingénieurs de structures.

Les calculs non-linéaires sont utilisés dans les situations particulières quand, par exemple, l'ingénieur doit faire des calculs à la rupture (par exemple « no-tension »), ou souvent quand, pour des événements exceptionnels, apparaissent de très hauts niveaux de contraintes, comme par exemple lors de forts séismes, ou pour réaliser des analyses en retour sur des structures qui ont été endommagées.

2) Les calculs en élasticité linéaire (qui n'ont qu'une solution) sont indubitablement ceux qui permettent les comparaisons des résultats les plus objectifs et les moins « pollués » par les choix initiaux des ingénieurs (même s'il est pas possible de les éliminer totalement).

Dans le cas du barrage en enrochement, il a été décidé que le cas le plus intéressant pour réaliser un bon banc d'essai était le cas correspondant à un chargement sismique.

Le barrage d'El Infiernillo au Mexique, d'une hauteur de 145 m, a été choisi parce qu'il fournit un exemple d'une structure réelle, même si on ne dispose que d'un nombre limité de paramètres relatifs aux matériaux.

Ce banc d'essai est donc par nécessité un compromis entre un calcul sur un exemple réel d'une part, mais avec un nombre de données limité d'autre part.

Il est clair qu'une solution de banc d'essai vraiment complète pour un barrage en enrochement est beaucoup plus difficile à établir que pour le calcul linéaire d'un barrage-voûte tel qu'il est considéré dans le même banc d'essai.

On a donc considéré que l'objectif ultime d'établir une solution de banc d'essai vraiment complète pour le barrage en remblai ne peut pas être atteint en un seul banc d'essai.

Cependant, il avait été prévu que les données fournies pouvaient générer suffisamment d'intérêt pour provoquer des discussions intéressantes au cours des sessions de l'atelier.

Cette base a ainsi permis de franchir une première étape avant de fournir un ensemble de données plus complètes pour un futur banc d'essai.

### **5.2.2. Analyse linéaire d'un barrage-voûte**

Le cas proposé pour l'analyse est relatif à un barrage italien réel, d'une hauteur de 77 m : le barrage de Talvacchia.

The choice of a linear elastic analysis was motivated by the two following reasons :

1) In concrete dams the stress levels are generally such as to maintain the structure in the linear-elastic range, with the possible exception of restricted zones of non linearity, which do not affect the global behaviour of the structure. Linear-elastic computations are therefore the most used by designers or structural engineers.

Non-linear analysis is used in particular situations, when, for example, the engineer has to carry out “ failure ” analyses (for example no-tension, etc), or when very high levels of stress are present due to exceptional events, like strong earthquakes, or to perform back-analysis on structures that suffered some damage.

2. The linear elastic computation (having a unique solution) is undoubtedly the one that presents less uncertainties in input data and allows a comparison of output data more objective and less “ polluted ” by engineering initial choices (even if it is impossible to eliminate them completely).

In the case of the embankment dam, it was decided that the most appropriate solution which is of major interest at this time, and one that would be most enlightening in terms of a well documented benchmark case, is the situation corresponding to seismic loading.

Thus 145 m high El Infiernillo dam, Mexico, was chosen because it provides a practical case history of an actual engineering structure, even if only a limited number of material parameters are available.

This benchmark is thus of necessity a compromise between a calculation on a documented case history, on the one hand, but with limited engineering data, on the other hand.

It was understood that a fully comprehensive benchmark solution for an embankment dam is much more difficult to establish than for the linear analysis of the arch dam, considered in the same workshop.

Thus it was considered that the ultimate aim of establishing a fully comprehensive benchmark solution for the fill dam could not be achieved in only one workshop.

However, it was anticipated that the data provided would generate enough interest so that a lively discussion could transpire during the actual workshop sessions.

This basis, so, would form a stepping stone for a more refined set of benchmark data for a further workshop.

### **5.2.2. Linear Analysis of an Arch Dam**

The case proposed for the analysis is relevant to a real 77 m high Italian dam : Talvacchia dam.

Ce barrage a aussi été choisi parce qu'il a été ausculté pendant de nombreuses années, à la fois en statique et en dynamique, au moyen de systèmes d'auscultation automatique installés dans la structure.

La grande quantité de données permet une compréhension complète de son comportement. La connaissance acquise du comportement réel de ce prototype pouvait être mise à la disposition des organisateurs pour qu'ils établissent les spécifications de la solution de référence du banc d'essai.

Les cas de calcul proposés couvrent les champs principaux des analyses pratiques qui sont :

- a) l'analyse thermique,
  - a.1) permanente,
  - a.2) périodique,
- b) l'analyse statique,
  - b.1) poids propre,
  - b.2) chargements hydrostatiques à différents niveaux de réservoir,
  - b.3) analyses des contraintes en considérant le chargement thermique obtenu en a.1),
- c) l'analyse dynamique (modes propres de la structure et évaluation de la forme des modes),
  - c.1) avec un réservoir vide,
  - c.2) avec un réservoir partiellement rempli en négligeant la compressibilité du fluide,
  - c.3) avec un réservoir partiellement rempli en considérant la compressibilité du fluide.

De façon à obtenir des résultats homogènes, un ensemble précis de données physiques était spécifié.

Ces valeurs, issues de l'expérience sur le barrage de Talvacchia mentionnée ci-dessus, sont :

- module d'Young élastique (béton) .....	$E_c = 3,60 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- module d'Young élastique (rocher) .....	$E_r = 1,20 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- coefficient de Poisson (béton) .....	$\nu_c = 0,20$
- coefficient de Poisson (rocher) .....	$\nu_r = 0,16$
- coefficient de diffusion thermique (béton) .....	$a = 1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- coefficient de dilatation thermique (béton) .....	$\alpha = 0,70 \cdot 10^{-5} \text{ (C)}^{-1}$
- poids volumique (béton) .....	$\gamma_r = 24 \text{ 000 N/m}^3$
- poids volumique (rocher) .....	$\gamma_c = 20 \text{ 000 N/m}^3$
- poids volumique (eau) .....	$w = 10 \text{ 000 N/m}^3$
- vitesse de l'onde de compression (eau) .....	$c = 1 \text{ 440 m/s}$
- coefficient de conductivité (béton) .....	$k = 200 \text{ W/m C}$

This dam has also been chosen for pluri-annual monitoring of both static and dynamic response by means of automatic monitoring systems installed on this structure.

The large amount of data having enabled a thorough understanding of its behaviour, the acquired knowledge of the actual behaviour of this prototype situation could be put at the disposal of the organisers in order to specify the benchmark reference solution.

The computational cases proposed, covering the main fields of analyses for practical interest, are as follows :

- a) thermal analysis,
  - a.1) steady-state,
  - a.2) periodic,
- b) static analysis,
  - b.1) dead weight,
  - b.2) hydrostatic loadings at different water levels,
  - b.3) stress analyses considering the thermal loading obtained at a.1),
- c) dynamic analysis (structural eigenvalues and modal shapes evaluation),
  - c.1) with empty reservoir,
  - c.2) with partially full reservoir neglecting the compressibility of the fluid,
  - c.3) with partially full reservoir considering the compressibility of the fluid.

In order to obtain homogeneous results a specified set of physical data were specified.

The values derived from the above mentioned experience on Talvacchia dam, are as follows :

- Young's elastic modulus (concrete) .....  $E_c = 3.60 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- Young's elastic modulus (rock) .....  $E_r = 1.20 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- Poisson's ratio coefficient (concrete) .....  $\nu_c = 0.20$
- Poisson's ratio coefficient (rock) .....  $\nu_r = 0.16$
- Thermal diffusivity coeff. (concrete) .....  $a = 1.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Thermal dilatation coeff. (concrete) .....  $\alpha = 0.70 \cdot 10^{-5} \text{ (C)}^{-1}$
- Specific weight (concrete) .....  $\gamma_r = 24 \text{ 000 N/m}^3$
- Specific weight (rock) .....  $\gamma_c = 20 \text{ 000 N/m}^3$
- Specific weight (water) .....  $w = 10 \text{ 000 N/m}^3$
- Compression wave celerity (water) .....  $c = 1 \text{ 440 m/s}$
- Conductivity coeff. (concrete) .....  $k = 200 \text{ W/m C}$

Le maillage d'éléments finis 3-D du barrage et de la fondation rocheuse ainsi que le maillage du réservoir, tels qu'ils sont suggérés pour les différents types de calcul, sont illustrés à la Fig. 2.

Le barrage et sa fondation sont considérés comme un corps monolithique à trois dimensions.

Si d'autres types d'éléments (par exemple, les hexaèdres à 20 nœuds, à 8 nœuds, les éléments de coques, etc.) sont utilisés, il est recommandable que le nombre total de degrés de liberté soit du même ordre de grandeur que dans le maillage proposé.

Les conditions aux limites thermiques à la fois pour l'état permanent (Fig. 3 a) et pour les analyses périodiques (Fig. 3 b) sont adiabatiques le long de la surface de contact entre le béton et le rocher.

Les valeurs de température sur les faces amont et aval du barrage sont du type sinusoïdal dans le cas thermique périodique :  $T = A \sin(\omega t + \varphi)$  (6).

Pour le calcul statique, les nœuds frontières sont fixes le long de la surface de contact entre le rocher discrétisé et la masse rocheuse extérieure (non discrétisée).

Pour les calculs dynamiques, les conditions aux limites correspondent à une fondation rigide dans le cas du réservoir vide, et une fondation flexible sans masse dans le cas de l'interaction fluide-barrage.

De cette façon, un cas très simple et un cas plus complexe ont été proposés simultanément aux participants du banc d'essai.

De façon à permettre la comparaison des résultats, les nœuds du maillage auxquels les températures (amplitudes et phases pour le cas thermique périodique), les déplacements et les contraintes devaient être calculés, ont été suggérés.

La position des nœuds où les résultats devaient être présentés sont montrés sur la Fig. 4 a. Ces résultats sont rassemblés dans des tableaux du type présenté à la Fig. 4 b.

Dans le cas du calcul dynamique, il fallait présenter au moins les six premières fréquences naturelles et les formes modales normalisées correspondantes.

Ces suggestions doivent être considérées comme un exemple de consignes pour l'établissement d'une solution de banc d'essai à comparer à d'autres solutions.

De façon à éviter les incompréhensions et les difficultés dans la comparaison des résultats, les données, les conditions aux limites, les cas de charge doivent être fournis aux participants d'une façon plus détaillée que ce qui est illustré ici.

D'autres suggestions pourraient être retenues comme la fourniture des données et des résultats sous forme de supports magnétiques (par exemple, disquettes) d'un format spécifié, de façon à permettre une comparaison plus automatique des résultats.

---

(6) Ces températures sont les variations par rapport à l'état thermique moyen du barrage.

Finite element 3-D meshes of the dam and rock foundation, together with the reservoir mesh, as suggested to be used for different sets of analyses, are illustrated in Fig. 2.

The dam and its foundation is considered as a three dimensional monolithic body.

If different element types (for example, brick with 20 nodes, 8 nodes, shell etc.) are used it is advisable that the total number of degrees of freedom should be of the same order as in the suggested meshes.

Thermal boundary conditions for both steady state (Fig. 3 a) and periodic analyses (Fig. 3 b) are adiabatic along the contact surface between concrete and rock.

The values of temperature on the upstream and downstream dam facings have a sinusoidal trend in the thermal periodic case :  $T = A \sin (\omega t + \varphi)$  (6).

For static analyses, the boundary nodes are fixed along the contact surface between the discretized rock and the outer (not discretized) rock mass.

For dynamic analyses, the boundary conditions are to correspond with a rigid foundation in the case of empty reservoir, and flexible foundation without mass in the case of fluid-dam interaction.

In this way, both a very simple case and a more complex one were proposed to participants in the B.W.

In order to make possible the comparison of results, nodes of the mesh are suggested at which the temperatures (amplitudes and phases for the periodic thermal case), displacements and stresses are to be calculated.

The position of the nodes at which the results should be presented are shown in Fig. 4 a. These results should be collected in tables of the kind shown in Fig. 4 b.

In the case of dynamic analyses, at least the first six natural frequencies and the relevant normalised modal shapes should be presented.

The above suggestions should be considered as an example of guide-lines for the setting out of a benchmark solution for comparison with other solutions.

In order to avoid misunderstandings and difficulties in the comparison of results, the set of data, boundary conditions, and loading cases have to be supplied to the participants in greater detail than that which is illustrated here.

Further suggestions could be relevant as to the arrangement of input and output data on a magnetic support (for example, floppy disk) in a specific format, in order to allow for a more automatic comparison of results.

---

(6) These temperatures are to be intended as variations with respect to the average thermal state of the dam.



Un avis final appelle ceux des participants qui effectuent des calculs, qui s'appuient sur des approches différentes de celles suggérées, à décrire ces différences en détail.

### **5.2.3. Calcul sismique non-linéaire d'un barrage en remblai**

Ce paragraphe décrit quelques-uns des détails qui ont été fournis aux participants du banc d'essai du calcul de la réponse sismique d'un modèle du barrage en remblai d'El Infiernillo d'une hauteur de 145 m. Celui-ci a subi des secousses notables au cours de deux séismes au moins.

L'objectif de ce banc d'essai, tel qu'il est publié, est le suivant : « on calculera à la fois la réponse en temps et le contenu spectral. Le tassement irréversible en crête sera calculé pour le cas d'une excitation moyenne. »

Aucune méthode particulière de calcul n'a été spécifiée pour effectuer le calcul de la solution du banc d'essai. En conséquence, les participants sont libres de choisir leur propre méthode.

Cependant, il est considéré comme probable que les méthodes sont à choisir parmi les suivantes :

1. A : Analyse statique linéaire suivie d'une analyse dynamique par la méthode de l'équivalent linéaire afin de déterminer la réponse en temps à partir de laquelle est calculé le contenu spectral.  
B : Ensuite, un calcul pour déterminer la déformation irréversible du barrage due au séisme.
2. Une solution approfondie utilisant une loi de comportement des matériaux de façon à suivre l'évolution du comportement des matériaux durant les chargements statiques et dynamiques.

Ce document contient une description du maillage par éléments finis de la structure et du domaine fluide.

Une description de base des matériaux de construction est aussi donnée ainsi que les paramètres rhéologiques des matériaux nécessaires pour réaliser le calcul 1 A ci-dessus.

#### *5.2.3.1. Maillage d'éléments finis*

Le maillage d'éléments finis 2 D est décrit sur la Fig. 5, à la fois pour la structure et pour le fluide.

Le maillage a été optimisé à la fois par une technique frontale et pour une solution utilisant une matrice bande (technique sky-line ligne d'horizon).

Deux types d'éléments sont utilisés : le quadrilatère isoparamétrique à 8 nœuds et le triangle isoparamétrique à 6 nœuds.

La convention de numérotation pour ces deux éléments est indiquée sur la Fig. 5.

La frontière entre la structure et le fluide est montrée sur la Fig. 5 (schéma inférieur), et le niveau du fluide pour le calcul est fixé à 172,4 m (NGF).

A final statement calls for those participants that carry out analyses based on approaches different from those suggested, to describe the differences in detail.

### **5.2.3. Non-linear Seismic Analysis of an Embankment Dam**

This section describes some of the details provided to the participants in the B.W. for calculating the seismic response of an idealisation of the 145 m high El Infiernillo embankment dam, which has experienced significant shaking during at least two seismic events.

The published aim for this workshop is as follows: “ Both time-history and spectral content should be calculated. For the case of medium excitation, the permanent settlement at the crest should be calculated ”.

Due to the fact that no particular method of analysis has as yet been specified for the benchmark solution, the participants are free to choose their own method.

However, it is considered likely that the methods will be chosen from the following options :

1. A : Linear static analysis followed by an equivalent-linear dynamic analysis to determine the time-history response from which the spectral content can also be obtained.  
B : Following the above, an analysis for computing the permanent deformation of the dam due to the given earthquake.
2. A fully comprehensive solution using a representative constitutive model, so as to follow the material behaviour during both static and dynamic loading.

This document contains a description of the finite element mesh for both structure and fluid domains.

A basic description of the construction material is also given, together with material parameters for conducting analysis 1. A above.

#### *5.2.3.1. Finite Element Mesh*

The 2 D finite element mesh is illustrated in Fig. 5, for both the structure and fluid regions.

The mesh has been optimised for both a frontal solution and a solution using a banded matrix (sky-line technique).

There are two different types of element : the isoparametric 8-node quadrilateral and 6-node triangle.

The node numbering conventions for both these elements are shown in Fig. 5.

Separation into structure and fluid is shown in Fig. 5 (lower diagram) and the fluid is taken to the design elevation of 172.4 m a.s.l.

Les mêmes numéros de nœuds sont utilisés à la frontière fluide-structure pour des raisons de connectivité. Les numéros des nœuds d'interface sont (de bas en haut) :

318 319 312 312 307 310 308 316 315 322  
321 325 324 326 286 288 231 235 234 238  
237 242 240 244 243 245 194 197 195 253  
251

Les numéros des zones de matériaux sont indiqués sur la Fig. 6.

Les conditions aux limites pour ce banc d'essai correspondent à une fondation rigide en tout point.

La fondation est supposée se déplacer uniquement dans la direction horizontale, avec une accélération fournie par l'enregistrement d'accélération en fonction du temps spécifié plus loin.

Le maillage d'éléments finis est défini par trois fichiers :

ELEMENTS.DAT,  
NODES. DAT,  
BC. DAT.

Ces fichiers contiennent la liste des éléments, des nœuds et des conditions aux limites.

Une description du format de lecture est indiqué en tête de chaque fichier.

### 5.2.3.2. Propriétés des matériaux - Généralités

Les matériaux des différentes zones sont décrits physiquement dans le Tableau 1.

Les matériaux de la fondation sont décrits uniquement pour information; ils ne sont pas modélisés dans ce calcul.

Bien que l'ensemble complet de données qui caractérisent les propriétés des matériaux ne soit pas disponible (7), le matériau est décrit par les données fournies sur la Fig. 7. Les données présentées dans le Tableau 2 peuvent être utilisées pour un calcul statique du barrage (cas 1. A), ou comme base pour un calcul dynamique (cas 1. B).

---

(7) Il arrive fréquemment, pour le calcul d'une structure prototype, et plus particulièrement lors des phases de projet initiales ou intermédiaires, qu'on ne dispose que d'une connaissance incomplète des données qui caractérisent les propriétés des matériaux, spécialement quand des calculs avancés doivent être effectués.

Il est alors souvent nécessaire de reconstruire certaines données à partir de la connaissance acquise du comportement de matériaux analogues.

The same node numbers are used at the structure-fluid interface for reasons of connectivity. The interface node numbers are (in order from the top) :

318 319 312 312 307 310 308 316 315 322  
321 325 324 326 286 288 231 235 234 238  
237 242 240 244 243 245 194 197 195 253  
251

The material zone numbers are shown in Fig. 6.

The boundary conditions for this benchmark are such that the dam is assumed to be fixed to a rigid foundation at all locations.

The foundation is assumed to move in the horizontal direction only, with an acceleration given by the acceleration-time record as specific in a later section.

The finite element mesh is defined by the three files :

ELEMENTS. DAT,  
NODES. DAT, and  
BC. DAT.

These files contain lists for elements, nodes and boundary conditions, respectively.

A description of the data format is given at the top of each file.

### 5.2.3.2. *Material Properties - General*

The materials of the various zones are described in a basic way in Table 1.

The foundation materials are described for reference only, and are not to be modelled in the analysis.

Although a full description of the material property data is not available (7), the material is summarised by the data given in Fig. 7, and the data given in Table 2 may also be used for an analysis of the dam for static loading (case 1. A), so as to give a basis for the dynamic calculation (case 1. B).

---

(7) *It is often the case in the analysis of a prototype structure, particularly at the initial and intermediate design stages, that there is an incomplete description of the material property data, especially when an advanced analysis is to be employed.*

*It is thus often necessary to reconstruct certain data from knowledge of the behaviour of similar materials.*

**Tableau 1**  
**Description conventionnelle des matériaux**

Matériaux du barrage		
Zone	Nom	Description
1	Noyau imperméable	Sol plastique argileux, limite de liquidité moyenne de 49 %, teneur en eau optimale moyenne de 19,3 %
2	Filtres	Sable alluvial lavé et criblé, maximum tamis 1/4 pouce D10 moyen 0,22 mm
3	Zones de transition	Marinage des excavations souterraines, conglomérat siliceux, diamètre maximal 150 mm D10 moyen 2 mm
4	Recharges internes	Enrochement compacté, roche dioritique ou conglomérat siliceux Diamètre maximal 45 cm
5	Recharges externes	Enrochement déversé : même matériau que 4
6	Batardeaux (intégrés)	Enrochement déversé : même matériau que 4
Matériaux de la fondation (non représentés dans le schéma de zonage)		
7	Alluvions fluviales	Blocs de rocher provenant de glissement des rives, enrobés de sable fin et contenant des troncs d'arbres
8	Rocher	Conglomérat siliceux avec des veines de basalte

**Tableau 2**  
**Constantes utilisées pour le calcul statique simplifié**

Zone	Matériau	Densité sèche (kg/m <sup>3</sup> )	Densité saturée (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson	E (MPa)
1	Noyau	1 580	2 000	0,49	250
2, 3, 4	Filtre, Zone de transition, Enrochement compacté	1 850	2 160	0,33	315
5	Enrochement déversé	1 760	2 100	0,33	150

**Table 1**  
**Basic Description of Materials**

Dam Material		
Zone	Name	Description
1	Impervious Core	Plastic clayey soils, average liquid limit 49 %, average optimum water content 19.3 %
2	Filters	Sand from alluvial deposits, washed and screened, maximum size 1/4 inch sieve, D10 average 0.22 mm
3	Transition Zone	Muck from underground excavations, silicified conglomerate, maximum size 150 mm, D10 average 2 mm
4	Inner Shoulder	Compacted rockfill, dioritic rock or silicified conglomerate, Maximum size 45 cm
5	Outer Shoulder	Dumped rockfill : same material as 4 above
6	Cofferdams (integrated)	Dumped rockfill, same material as 4 above
Foundation Material (not shown in zonation plot)		
7	River-bed Deposits	Rock blocks from slides in abutments packed with fine sands and containing tree stumps
8	Bed-rock	Silicified conglomerate with basaltic dikes

**Table 2**  
**Constants used for simplified static analysis**

Zone	Material	Dry Density (kg/m <sup>3</sup> )	Saturated Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	E (MPa)
1	Core	1 580	2 000	0.49	250
2, 3, 4	Filter, Transition, Compacted Rockfill	1 850	2 160	0.33	315
5	Dumped Rockfill	1 760	2 100	0.33	150

5.2.3.3. Propriétés pour un calcul équivalent linéaire

La variation du module de cisaillement en fonction de l'amplitude de la déformation cyclique  $\gamma$ , est donnée, pour les différents matériaux, par la formule suivante :

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{a - b \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

Les valeurs correspondantes des constantes sont fournies dans le Tableau 3, et les courbes associées sont représentées sur la Fig. 8.

**Tableau 3**  
**Constantes pour le module de cisaillement dynamique**

Zone	Matériau	a	b	$G_{\max}$
1	Noyau	0,02335	0,94957	1,05042
2	Filtre	0,02348	0,94959	1,05040
3	Zone de transition	0,01788	0,94906	1,05093
4	Enrochement compacté	0,01788	0,94066	1,05074
5	Enrochement déversé	0,01699	0,94897	1,05103

Dans le cas du noyau,  $G_{\max}$  est égal à 2 395  $S_u$  avec une valeur moyenne de  $S_u = 0,0775$  MPa.

Pour tous les autres matériaux,  $G_{\max}$  est défini selon la formule :

$$G_{\max} = CK_2 (\sigma_0)^{0,5} \quad (2)$$

où  $C = 6,921$  MPa,  $\sigma_0$  est la contrainte moyenne et  $K_2 = 150$  pour le filtre, les zones de transition et d'enrochements compactés, et  $K_2 = 100$  pour les zones d'enrochements déversés.

Le coefficient d'amortissement du matériau,  $\zeta$ , est défini par la formule suivante :

$$\zeta = \gamma_{\min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{\frac{1}{\gamma_{\min}} + \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

où les coefficients pour les différents matériaux sont donnés dans le Tableau 4 et les courbes associées sont représentées sur la Fig. 9.

### 5.2.3.3. Properties for an Equivalent- linear Analysis

The variation of shear modulus with cyclic strain amplitude ( $\gamma$ ), should be established for the various materials on the basis of following formula :

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{a - b \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

The corresponding values of the given constants are as shown in Table 3, and resulting in the curves displayed in Fig. 8.

**Table 3**  
**Constants for dynamic shear modulus**

Zone	Material	a	b	$G_{\max}$
1	Core	0.02335	0.94957	1.05042
2	Filter	0.02348	0.94959	1.05040
3	Transition	0.01788	0.94906	1.05093
4	Compacted Rockfill	0.01788	0.94066	1.05074
5	Dumped Rockfill	0.01699	0.94897	1.05103

In the case of the core,  $G_{\max}$  is defined as  $2.395 S_u$  where an average value of  $S_u = 0.0775$  MPa should be taken.

For all other materials,  $G_{\max}$  is defined as :

$$G_{\max} = CK_2 (\sigma_0)^{0.5} \quad (2)$$

where C is given in terms of SI units (MPa) as 6.921,  $\sigma_0$  is the mean stress and  $K_2$  is defined as 150 for the filter, transition and compacted rockfill zones, and as 100 for the dumped rockfill zones.

The material damping,  $\zeta$ , should be based on the following formula :

$$\zeta = \gamma_{\min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{\frac{1}{\gamma_{\min}} + \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}} \frac{\gamma}{\gamma_r} \quad (3)$$

where the factors for the different materials are given in Table 4 and resulting in the curves displayed in Fig. 9.



**Tableau 4****Constantes pour le coefficient d'amortissement des matériaux**

Zone	Matériau	$\gamma_r$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
1	Noyau	0,02335	0,06096	0,22512
2	Filtre	0,02348	0,03613	0,25122
3	Zone de transition	0,01788	0,03391	0,23583
4	Enrochement compacté	0,02000	0,02630	0,25133
5	Enrochement déversé	0,01699	0,02814	0,23088

**5.2.3.4. Autres propriétés des matériaux**

Les propriétés des matériaux autres que celles qui sont données ci-dessus, qui peuvent être nécessaires pour différents modèles de comportement ou différentes méthodes de calcul, doivent être établies par les participants en fonction de la connaissance de matériaux analogues.

Les hypothèses et les références doivent être clairement établies afin de permettre une comparaison des données entre elles au cours de ce banc d'essai et des suivants.

**5.2.3.5. Enregistrements d'accélération sismique**

Trois accélérogrammes de séismes sont donnés. Les deux premiers, dans les fichiers

EQ1.DAT et

EQ2.DAT

sont tirés des enregistrements réalisés dans une galerie basse à El Infiernillo durant les séismes du 14 mars 1979 et du 19 septembre 1985. Ces enregistrements constituent les données pour le calcul de la réponse respectivement pour des excitations faibles ou moyennes.

Le troisième accélérogramme, dans le fichier

EQ3.DAT

provient de l'enregistrement standard Suisse HSK. Il est donné comme enregistrement additionnel pour les sollicitations d'intensité moyenne. Cet enregistrement additionnel peut aussi être utilisé dans le cas d'une sollicitation d'intensité élevée. L'enregistrement est fourni avec une accélération de pic de 0,1 g, mais il peut être modifié par une affinité pour obtenir un pic de 0,3 g ou de 0,65 g qui correspondent à une intensité moyenne ou à une intensité forte.

Les formats d'enregistrement sont indiqués au début de chaque fichier. En résumé, chaque ligne d'enregistrement contient 8 valeurs d'accélération et un code de contrôle, écrits avec le format (8 F9.6, I8).

Le pas de temps est de 0,02 seconde à l'exception de EQ3.DAT où il est égal à 0,005 seconde.

Un tracé de chaque accélérogramme est donné sur la Fig. 10 (a, b, c).

**Table 4**  
**Constants for material damping**

Zone	Material	$\gamma_r$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
1	Core	0.02335	0.06096	0.22512
2	Filter	0.02348	0.03613	0.25122
3	Transition	0.01788	0.03391	0.23583
4	Compacted Rockfill	0.02000	0.02630	0.25133
5	Dumped Rockfill	0.01699	0.02814	0.23088

#### 5.2.3.4. Other Material Properties

Material properties other than those given above, which may be required for various material models or analytical methods, are to be established by the participant on the basis of known results for similar materials.

The assumptions and references should be clearly stated, so as to enable the given data to be compared in this and future workshops.

#### 5.2.3.5. Earthquake Acceleration Records

Three earthquake accelerograms are given. The first two, files

EQ1.DAT, and

EQ2.DAT,

are taken from recordings made within a lower gallery at El Infiernillo during the March 14, 1979 and September 19, 1985 seismic events. These records constitute the input records for calculating the response under low and medium excitation, respectively.

The third accelerogram, file

EQ3.DAT,

is taken from the Swiss standard HSK record and is given as an additional record for medium intensity loading. This record should also be used for the case of high intensity loading. As presented, the peak acceleration is 0.1 g, but the record will have to be scaled to give either a peak of 0.3 g or 0.65 g to correspond with a medium intensity or a high intensity loading, as required.

The file formats are described at the top of each file. To summarise, each line of the files contains eight acceleration values and a progressive control number written with the format (8 F9.6, I8).

The time step is 0.02 second except in EQ3.DAT where it is 0.005 second.

A plot of each accelerogram is given in Fig. 10 (a, b, c).

### 5.2.3.6. Présentation des résultats

La réponse en déplacement du barrage pour un accélérogramme donné doit être calculée en fonction des informations fournies dans le Tableau 5.

Les résultats de l'accélération horizontale et du contenu spectral doivent être calculés aux points spécifiés pour les séismes EQ1 et EQ2, de même que le déplacement irréversible (8) à tous les nœuds indiqués sur la Fig. 11 a.

Dans le cas d'un calcul très complet (solution type 2), l'enregistrement EQ3 peut aussi être utilisé, et les graphiques, en fonction du temps, des déplacements horizontaux et verticaux aux divers points indiqués sur la Fig. 11 a seront présentés, ainsi que les contraintes verticales, horizontales et de cisaillement, dans le temps, aux divers points de Gauss indiqués sur la Fig. 11 a.

**Tableau 5**

#### **Données sismiques et position des points pour les résultats demandés**

Nom de l'enregistrement du séisme Base rigide	Accélération de pointe (g)	Positions pour lesquelles les résultats des calculs doivent être fournis	Numéro du Nœud EF
EQ1.DAT	0,1	Crête	486
EQ2.DAT	0,29	Risberme aval	851
EQ3.DAT	0,3	Voir Fig. 7	-
EQ3.DAT	0,65	Voir Fig. 7	-

### 5.2.4. Analyse statique et réponse sismique d'un barrage en remblai

L'expérience des deux premiers bancs d'essai fournit une bonne base pour savoir comment procéder pour obtenir des résultats positifs et valables.

Le premier banc d'essai a vu apparaître des contributions intéressantes, mais les comparaisons entre les résultats présentés par les différents participants n'étaient pas faciles à faire. D'abord, les hypothèses de base de chaque calcul pouvaient être très différentes les unes des autres. Ensuite, les données fournies n'étaient pas adaptées aux calculs de type 2 (avec un modèle de comportement représentatif). Par conséquent, les résultats présentés étaient confus.

Pour le deuxième banc d'essai, le même cas d'étude a été proposé (le barrage en remblai d'El Infiernillo) et on attacha une importance particulière aux points suivants :

- propriétés des matériaux,
- définition d'un calcul statique pour obtenir un champ de contraintes effectives et de pressions interstitielles réaliste comme état initial du calcul dynamique,
- simulation des composantes horizontales et verticales de l'excitation sismique,

---

(8) Le déplacement irréversible doit être calculé si cela est possible, par exemple, en utilisant une solution du type 1 B ou 2.

5.2.3.6. *Presentation of Results*

The displacement response of the dam to the given earthquake records should be calculated according to the information given in Table 5.

The results of horizontal acceleration and spectral content should be calculated for the specified location for earthquakes EQ1 and EQ2, together with the permanent deformation (8) at all node points given in Fig. 11 a.

In the case of a fully comprehensive analysis (solution type 2), the shorter record, EQ3, may also be used, and time-history plots of horizontal and vertical displacement at all locations shown in Fig. 11 a should be presented, together with time histories of vertical, horizontal and shear stress at all Gauss points shown in Fig. 11 a.

**Table 5**  
**Earthquake data and location of required results**

Rigid-base earthquake record name	Peak acceleration (g)	Location for which calculated results are to be obtained	FE node number
EQ1.DAT	0,1	Crest	486
EQ2.DAT	0.29	Downstream berm	851
EQ3.DAT	0.3	As specified in Fig. 7	-
EQ3.DAT	0.65	As specified in Fig. 7	-

**5.2.4. Static Analysis and Seismic Response of an Embankment Dam**

The experience of the first two Benchmark Workshop serves as a good basis to explain how to proceed to have positive and worthwhile results.

The first Benchmark Workshop gave rise to interesting contributions, but comparisons between the results presented by the different participants were not easy to do. First, the basic assumptions of each analysis could be very different from another one. Secondly, the given data was convenient for the analysis of type 2 (with a representative constitutive model). Lastly and consequently presented results were scattered.

For the 2nd B.W. the same case study as envisaged in the first B.W. was retained (El Infiernillo embankment dam) and special attention was paid to the following aspects :

- material properties,
- definition of a static analysis leading to a realistic field of effective stresses and pore pressures for the dynamic analysis,
- simulation of both horizontal and vertical components of seismic excitation,

---

(8) *The permanent deformation should be calculated if possible, for example, using solution type 1 B or 2.*

– standardisation de la présentation des résultats pour faciliter la comparaison pendant l'atelier du banc d'essai.

Le maillage du barrage est le même que pour le premier banc d'essai sans la zone du réservoir.

Tout ceci suppose un travail de préparation long et difficile, effectué par une équipe composée de spécialistes de calcul, d'experts en essais de laboratoire et d'experts en reconnaissances de terrain.

Les paragraphes suivants expliquent les principaux problèmes rencontrés et comment ils ont été résolus.

#### *5.2.4.1. Propriétés des matériaux*

Les matériaux des différentes zones, tels que décrits sur la Fig. 6 et dans le Tableau 1, peuvent être divisés en 4 groupes principaux : le noyau, le filtre, le matériau de transition, l'enrochement.

La densité des grains, la densité sèche et la perméabilité de chaque matériau sont données dans le Tableau 6 (non publié).

Un ensemble d'essais en laboratoire effectués sur des échantillons en provenance du noyau durant la construction est composé d'un diagramme de plasticité, d'essais d'identification, d'essais triaxiaux consolidés non drainés et d'un essai œdométrique.

Peu d'informations sont disponibles pour les filtres. Il n'y a que quelques essais triaxiaux consolidés drainés réalisés sur des échantillons de sable utilisé pour les filtres.

Ces échantillons avaient un diamètre de 113 cm et une hauteur de 250 cm.

Il n'y a pas d'information sur les matériaux de transition. Chaque participant peut, soit estimer les paramètres sur la base de résultats connus relatifs à des matériaux analogues, soit adapter les paramètres du filtre ou de l'enrochement.

Cependant, laisser le choix à chaque participant conduit à l'impossibilité pratique de comparer les résultats.

Pour les futurs bancs d'essais, aucune latitude ne sera laissée dans le choix des paramètres (chaque fois que cela sera possible).

Différents types d'enrochements ont été utilisés sur le site, notamment des enrochements déversés et des enrochements compactés pour les recharges, et du plus gros enrochement sur la partie amont et au-dessus de la cote 110.

Le gros enrochement est assimilé à l'enrochement déversé. Exceptionnellement, quelques essais en laboratoire sur les enrochements sont disponibles. Deux séries de tests ont été réalisées sur des échantillons lâches et denses avec des densités moyennes correspondant à peu près à celles des enrochements déversés et compactés.

Les principaux résultats de chaque test de laboratoire sont donnés dans des tableaux afin d'indiquer aux participants la plage de variation des caractéristiques des matériaux.

- standardization of the output results to be compared during the B.W.

The proposed mesh of the dam is the same as for the 1st B.W. without the fluid region.

All of this involves long and difficult preparation work carried out by a team which includes specialists of computing, modeling laboratory test expertise and site expertise.

The following paragraphs explain the main problems encountered and how they have been solved.

#### *5.2.4.1. Material Properties*

The materials of the various zones, as described in Fig. 6, as well as in Table 1, can be divided into 4 main groups : core, filter, transition material, rockfill.

The grain density, dry density and permeability of each material are given in Table 6 (not reported).

A complete set of laboratory tests with samples obtained from the core material during construction were composed of a plasticity chart, classification tests, CU triaxial tests and one oedometer test.

Little information is available on the filters. Only some CD triaxial tests were performed with samples from the sand used for the filters.

These samples were 113 cm in diameter and 250 cm high.

No further information is available on the transition material. The participant may either estimate parameters on the basis of known results on similar materials, or adapt parameters from the filter or rockfill materials.

However, leaving a choice to each individual participant means that it is practically impossible to compare results.

In future B.W. no choice of numerical parameters should be left open (whenever possible).

Different types of rockfill were used on the site, particularly dumped and compacted rockfill for the dam shoulders and large-sized rockfill on the upstream slope of the dam above el. 110.

The large-sized rockfill will be assimilated to “ dumped rockfill ”. Exceptionally some laboratory tests with rockfill materials are available. Two series of tests were carried out on loose and dense samples at mean densities closely corresponding to those of the dumped and compacted rockfill respectively.

The main results of each laboratory test are given in tables to provide the participants with the range of variation of the material characteristics.

En pratique, il est recommandé d'utiliser les valeurs moyennes. Quelques courbes expérimentales obtenues avec des échantillons « moyens » sont fournies sous forme graphique et sur disquette. Il a été décidé de fournir aux participants les données usuelles des matériaux (courbes triaxiales, courbes d'essais *in situ*, etc.), de laisser à chaque participant le soin d'analyser ces données, d'évaluer leur consistance et la bonne adéquation avec leur propre calcul, et de choisir les paramètres pour ses lois de comportement.

Cependant, cette procédure mêle la validation stricte du logiciel et la justification de la méthode. Cela n'est pas à recommander. Pour les prochains bancs d'essais, il a été décidé de fournir à la fois les paramètres de base des lois de comportement et les données usuelles des matériaux. Chaque participant doit utiliser les paramètres de base; il est autorisé à procéder en parallèle à d'autres calculs utilisant des lois de comportement plus avancées.

Dans ce dernier cas, le participant doit utiliser les données usuelles et expliquer comment, à partir de celles-ci, il détermine ses propres paramètres et, si possible, quel est leur sens physique.

Le participant doit aussi montrer quelle est l'amélioration obtenue en ce qui concerne la compréhension du comportement des matériaux ou la concordance avec les résultats de l'auscultation, etc.

Par ces moyens, la validation est clairement isolée, et donc, bien faite. Il est alors également possible de présenter de nouveaux travaux de recherches à la communauté des ingénieurs et d'évaluer l'intérêt du développement de ces nouvelles méthodes.

Il n'y a pas d'information quantitative disponible en ce qui concerne les propriétés dynamiques des matériaux, c'est-à-dire sous chargement cyclique. En conséquence, il a été proposé de déterminer ces paramètres sur la base des mesures *in situ* réalisées après le séisme de 1979 (accélération maximale en crête et déplacements irréversibles en crête et aux cotes 80 et 120) et de prédire, sur cette base, le comportement du barrage pour le séisme de 1985.

#### 5.2.4.2. Définition des calculs statiques

De manière à prendre en considération l'histoire complète des matériaux, plusieurs calculs statiques doivent être réalisés, notamment :

- phase de construction, avec une vitesse de mise en place du remblai de 10 mètres par mois et avec une période de consolidation optionnelle avant l'étape suivante,
- mise en eau du réservoir suivant une courbe, observée et simplifiée, de la cote du plan d'eau en fonction du temps,
- consolidation jusqu'à obtenir la stabilisation des pressions interstitielles et des contraintes effectives.

Les résultats obtenus à la fin de cette phase sont considérés comme l'état initial du calcul dynamique.

Les conditions aux limites prennent en compte les aspects suivants :

- le rocher de fondation est supposé rigide et imperméable,

In practice, it is recommended to operate with average values. Only some experimental curves obtained with "average" samples are provided in graphical form and on a computer diskette. It was decided to provide the participants with the usual material data (triaxial curves, *in situ* test curves etc.) and to let each participant analyze this data, evaluate its consistency and its adequacy for his own analysis and choose the parameters for his constitutive law.

However this procedure mixes the pure validation of the coding and the general justification of the method. This is not recommendable. For the next benchmarks, it has been decided to provide both the basic parameters for the constitutive laws and the usual material data. Each participant should use the basic parameters; he is allowed to proceed in parallel with other computations based on more advanced constitutive laws.

In this last case, the participant has to use the usual material data, to explain how he determines his proper parameters from them and, if possible, what their physical meanings are.

The participant is also requested to show what is the improvement obtained from the results, as far as the understanding of the behaviour of the material, or the fitting with instrumentation, etc, are concerned.

By this means, the validation is clearly isolated and by consequence, well-done, and there is the possibility to present new research to the professional community and to test the interest of the development of new method.

No quantitative information is available on the dynamic properties of the material, i.e. under cyclic loading. Therefore it was proposed to fit these parameters on the known site measurements after the 1979 earthquake (maximum acceleration at crest and irreversible displacements at crest, at elevation 80 and 120) and to predict the behaviour of the dam during the 1985 earthquake.

#### 5.2.4.2. *Definition of Static Analyses*

In order to take into account the entire history of the materials, different static analyses which have to be made include :

- construction phase, with a regular rate of 10 m elevation per month and with an optional consolidation period before the next stage,
- reservoir impounding, described by a simplified observed curve of the reservoir level increase versus time,
- consolidation so as to obtain stabilization in pore pressures and effective stresses.

The results obtained at the end of this phase will be considered as the initial state to be used for the dynamic analysis.

The boundary conditions will take into account the following aspects :

- the rock foundation is assumed to be rigid and impervious,



– la condition aux limites sur le talus amont du barrage est directement liée au niveau du réservoir.

Le format de sortie des résultats est donné précisément, et des figures prototypes sont fournies pour faciliter les comparaisons et les discussions durant la réunion :

- à la fin de la construction, de la mise en eau et de la consolidation :
  - isovaleurs des contraintes effectives,
  - isovaleurs des pressions interstitielles,
- à la fin de la construction :
  - tassements et déplacements horizontaux le long d'une ligne verticale dans le noyau (AA) et selon deux lignes horizontales aux cotes 120 (BB) et 80 (CC) (voir Fig. 11 b).

Enfin, un tableau résume quelques résultats pour 5 nœuds, à savoir les déplacements associés aux trois phases statiques principales.

#### 5.2.4.3. Définition du calcul dynamique

Les participants doivent d'abord reproduire deux essais triaxiaux cycliques pour le seul matériau du noyau.

Cela peut donner des indications sur la capacité des paramètres du modèle choisi de reproduire le comportement cyclique usuel de l'argile.

Cela peut aussi être utile pour expliquer certaines différences entre les différents calculs.

Une première étape (obligatoire) consiste à simuler le comportement du barrage durant le séisme de 1979 et une deuxième (facultative) l'effet du séisme de 1985 sur le barrage. Cette dernière étape fera intervenir les propriétés du matériau utilisées dans la première étape et les conditions initiales obtenues après une période de consolidation de 6 années postérieurement au séisme de 1979.

Les résultats de ces calculs dynamiques sont comparés en terme d'accélération absolues, de déplacements et de pressions interstitielles aux nœuds prescrits, en fonction du temps.

Un tableau général résumé inclut pour chacun de ces nœuds :

- les accélérations maximales horizontale et verticale,
- les déplacements irréversibles horizontal et vertical,
- les surpressions interstitielles à la fin du séisme.

#### 5.2.4.4. Autres informations

Des informations complémentaires concernant les outils et les méthodes utilisés par les participants sont demandées. Elles concernent principalement :

- une brève description du logiciel et de l'ordinateur utilisés,
- le temps de calcul pour chaque étape des calculs statique et dynamique,
- les lois de comportement et les principales hypothèses adoptées pour représenter les matériaux en statique et en dynamique.

– the dam's upstream face boundary conditions are directly related to the reservoir level.

The output format for the following results are given precisely, and templates are provided to facilitate the comparisons and discussions during the meeting :

- at the end of construction, impounding and consolidation :
  - effective stress contour lines,
  - pore pressures contour line,
- at the end of consolidation :
  - settlements and horizontal displacements along one vertical line in the core (AA) and two horizontal lines at El. 120 (BB) and 80 (CC) (see Fig. 11 b).

Lastly a summary table will also be given for 5 nodes. It summarizes the displacements due to the three main static phases.

#### 5.2.4.3. *Definition of Dynamic Analysis*

First, the participants should reproduce two cyclic triaxial tests for the core material only.

This could provide some information on the ability of the chosen model parameters to reproduce the usual cyclic behaviour of clay.

It could be also useful to explain some discrepancies between different analyses.

A compulsory step is to simulate the dam behaviour the 1979 earthquake and optionally the effect of the 1985 earthquake on the dam. This last step should be taken with the material properties used in the previous step and with initial conditions which are those obtained after a period of consolidation of 6 years after the 1979 earthquake.

The results of these dynamic analyses are compared in terms of absolute accelerations, displacements and pore pressures at the prescribed nodes, versus time.

A general summary table will contain, for these nodes :

- maximum horizontal and vertical acceleration,
- irreversible horizontal and vertical displacement,
- excess pore pressure at the end of the earthquake.

#### 5.2.4.4. *Other Information*

Complementary information on the tools and methods used by participants are also required. They mostly concern :

- a short description of the hardware and software used,
- the computation times for each step of the static analysis and for the dynamic analysis,
- the constitutive models and main assumptions made on the materials for both static and dynamic analysis.

---

## 6. EXEMPLE DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'UN BANC D'ESSAI TYPE

---

Comme les comptes rendus du premier banc d'essai viennent d'être publiés, cette partie du Bulletin est une simple ébauche. Elle sera perfectionnée dès que possible.

### 6.1. EXEMPLE DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'UN BANC D'ESSAI TYPE : THÈME A (BARRAGE-VOÛTE EN BÉTON)

Pour que la comparaison entre les calculs réalisés par plusieurs participants soit claire, la présentation la plus appropriée des résultats consiste à présenter les valeurs numériques sous forme de graphiques qui montrent la réponse de la structure en terme de déplacements et contraintes à l'intérieur de la structure.

Sur la base de ce critère, on peut considérer la courbe des résultats de la console de clé et/ou de l'arc de crête.

Les Fig. 12 à 20 réalisées pour le thème A (barrage-voûte) du premier banc d'essai, qui s'est tenu à Bergame les 28 et 29 mai 1991, donnent un exemple de ce type de présentation. Ce petit échantillon de résultats montre déjà que les différences peuvent être importantes en particulier en ce qui concerne les contraintes.

Par ailleurs, pour certaines valeurs importantes comme les déplacements du couronnement, il est possible de définir une bande étroite qui contient pratiquement tous les résultats.

S'il est possible d'expliquer clairement et immédiatement certaines des différences qui sont dues par exemple à des hypothèses initiales différentes selon les calculs, d'autres différences demandent une investigation plus soignée.

Pour cela, il apparaît nécessaire de constituer un groupe permanent de chercheurs qui pourraient consacrer suffisamment de temps et d'effort pour parvenir à expliquer les raisons des différences et les réunir dans un rapport final qui pourrait alors constituer l'un des résultats les plus précieux du banc d'essai.

Bien sûr, cette procédure soulève la question du financement, de l'organisation, etc, qui doit être résolue dans le cadre de la CIGB et avec l'aide matérielle de grandes organisations intéressées par ce sujet.

---

## 6. EXAMPLE OF PRESENTATION OF RESULTS FOR A TYPICAL BENCHMARK - WORKSHOP

---

As the Proceedings of the first Benchmark-Workshop have been just published, this part of the report is quite sketchy in the present Bulletin. It will be perfected as soon as possible.

### 6.1. EXAMPLE OF PRESENTATION OF RESULTS FOR A TYPICAL BENCHMARK-WORKSHOP: THEME A (CONCRETE ARCH DAM)

The most appropriate presentation of results in order to provide a clear comparison among analyses carried out by several participants is to set up numerical values in graphs which can indicate the trend of structural response in terms of displacements and stresses inside the structural body.

Based on this criteria results relevant to central cantilever and/or the crest arch could be considered.

Fig. 12-20, that were set up for theme A (concrete arch dam) of the first Benchmark Workshop held in Bergamo in 28-29 May 1991, provide an example of this kind of presentation. Looking at this small sample of results it is already possible to find out how large, in some cases, the discrepancies are, particularly when stresses are concerned.

On the other hand, for some quantities of interest (e.g. the crown displacements) it is possible to define a narrow band within which practically all results are contained.

While it is possible to explain clearly and immediately some of the discrepancies, due, for instance, to different initial assumptions in the computations, some other deviations need to be investigated more carefully.

To this end, it would appear necessary to set up a permanent group of researchers who could devote an adequate amount of time and efforts to unravel the causes of discrepancy and record them in a final report, which would then constitute one of the most precious results of the B.W.

Of course, this way of proceeding entails questions of funding, organization etc. which need to be solved within the framework of ICOLD and with the material help of large organizations interested in the subject matter.

## **6.2. EXEMPLE DE PRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'UN BANC D'ESSAI TYPE : THÈME B (BARRAGE EN REMBLAI)**

Les résultats qui sont utilisés comme base de la comparaison des différents types de calcul doivent être choisis de façon qu'ils reflètent le comportement global du barrage de la meilleure façon possible.

Ce choix dépend donc du type de barrage en remblai (voir Section 5.1.2. § 2) et des charges appliquées.

Dans le cas du barrage à noyau argileux qui a été exploité lors des deux premiers bancs d'essais, les résultats de l'analyse statique et ceux de l'analyse dynamique doivent être distingués.

Avec les méthodes des éléments finis, l'analyse statique fournit une grande quantité de résultats à chaque noeud ou à chaque point d'intégration et à chaque pas de temps.

Le post-traitement d'un tel calcul permet d'exprimer ou de dessiner au moins :

- les principales valeurs calculées :
  - déplacements horizontaux et verticaux,
  - pressions interstitielles (dans le noyau),
  - contraintes effectives (3 composantes en analyse 2D et 6 en analyse 3 D),
- aux étapes importantes de l'histoire du barrage, par exemple :
  - fin de construction,
  - après remplissage de la retenue,
  - à l'état permanent après consolidation,
- sur quelques sections du modèle, par exemple (Fig. 11 b) :
  - suivant l'axe vertical du noyau,
  - selon des sections amont-aval à différentes cotes,
- en certains points significatifs du noyau et de l'enrochement (Fig. 11 c).

Une sélection des résultats les plus significatifs est absolument nécessaire pour simplifier le travail de comparaison. Ces résultats significatifs doivent être discriminants.

Par exemple, les contraintes totales ne sont pas discriminantes parce que tous les logiciels d'éléments finis donnent approximativement les mêmes contraintes totales pour une géométrie donnée et des densités données; elles sont à peu près indépendantes des lois de comportement des matériaux.

En s'appuyant sur le principe des contraintes effectives de Terzaghi ( $\sigma = \sigma' + u$ ), il est suffisant de ne comparer que la pression interstitielle parce que les différences entre les pressions interstitielles calculées par les participants au banc d'essai sont analogues aux différences entre les contraintes effectives correspondantes.

## **6.2. EXAMPLE OF PRESENTATION OF RESULTS FOR A TYPICAL BENCHMARK-WORKSHOP : THEME B (EMBANKMENT DAM)**

The results, which are used as a basis of comparison for different types of analyses, must be chosen in such a way as to reflect the overall dam behaviour in the best way possible.

This choice therefore depends upon the type of embankment dam (see Section 5.1.2. § 2) and the loading applied.

In the case of the dam with a clayey core which has already been used for the first two benchmarks, the results of the static analysis and those of the dynamic analysis must be distinguished.

Static analysis with finite element method provides a large amount of results at each node or integration point and for each computed time.

Post-treatment of such analysis allows to print or draw at least :

- the main computed values :
  - horizontal and vertical displacements,
  - pore pressure (in the core),
  - effective stresses (3 components in 2 D Analyses and 6 in 3 D),
- at important times in the load history of dam, for examples :
  - end of construction,
  - after impounding,
  - steady state after consolidation,
- on some sections of the model, for example (Fig. 11 b) :
  - along the vertical axis of the core,
  - upstream/downstream cross-sections at various elevations,
- on some significant locations in the core and the rockfill (Fig. 11 c).

Therefore a selection of the most significant results is absolutely useful to simplify the comparison work. These significant results should be discriminating.

For example, the total stress is not discriminating because all finite element softwares give approximately the same total stress for a given model geometry and given densities; it is roughly independent of the constitutive model.

In addition, according to the principle of effective stress ( $\sigma = \sigma' + u$ ) of Terzaghi, it is sufficient to compare the pore pressure only because the discrepancies between the pore pressures computed by the BW participants are similar to the discrepancies between the corresponding effective stresses.

En pratique, quelques valeurs calculées significatives sont suffisantes pour avoir une idée globale de la capacité de reproduire le comportement du barrage :

- A l'état permanent après consolidation :
  - les déplacements horizontaux et verticaux cumulés depuis le début de la construction,
  - dans les sections AA, BB, CC,
- Pour certains points du noyau CM et CL de la Fig. 11 c :
  - la pression interstitielle,
  - au cours de l'histoire complète du barrage.

Si certains écarts entre les valeurs obtenues avec ces deux méthodes différentes ne peuvent être expliqués facilement à l'aide des graphiques définis ci-dessus, il est toujours possible d'avoir recours à d'autres valeurs calculées disponibles de façon à déterminer où apparaissent les principaux écarts.

Les analyses dynamiques fournissent aussi une quantité considérable de valeurs calculées : de la même façon que pour l'analyse statique, les déplacements et les pressions interstitielles sont calculés et conservés sur disques à chaque noeud ou à chaque point d'intégration et à chaque pas de temps.

En dynamique, un accélérogramme réel est en général fourni selon un pas de temps de 0,01 (ou 0,02) seconde. Si la durée de l'accélérogramme est par exemple de 10 secondes, 1 000 points (et en conséquence 1 000 pas de temps) doivent être utilisés dans le calcul. De plus, les vitesses et les accélérations doivent être ajoutées à la liste des valeurs calculées.

En général, tous les résultats calculés sont présentés sous la forme de courbes en fonction du temps et du contenu spectral.

Cependant, il est pratiquement impossible de comparer plusieurs courbes en fonction du temps en les décrivant toutes sur un seul graphique.

Il vaut mieux effectuer la comparaison sur les valeurs moyennes ou maximales.

Le même type de graphique que ceux proposés pour les barrages-voûtes en béton doivent permettre d'effectuer les comparaisons en différents points du barrage pour :

- les accélérations maximales horizontales et verticales,
- les déplacements irréversibles, horizontaux et verticaux, à la fin du séisme,
- la pression interstitielle maximale,
- la pression interstitielle finale,
- le lieu de la valeur maximale de la pression interstitielle à la fin du séisme.

A cause de la grande variété des méthodes et des données choisies par les différents participants, il n'a pas été possible de faire une comparaison quantitative après le premier banc d'essai.

Une telle comparaison peut être envisagée pour le deuxième banc d'essai, pour lequel les spécifications fournies sont plus complètes et plus précises.

In practice, some significant computed values are sufficient to have an overall idea of the capacity to reproduce the behaviour of the dam :

- at the steady state after consolidation :
  - the vertical and horizontal displacements cumulated since the beginning of construction,
  - on sections AA, BB and CC,
- for some locations in the core CM and CL in Fig. 11 c :
  - pore pressure,
  - during the whole load history of the dam.

If some discrepancies between values obtained with these two different methods cannot be explained easily with the above-mentioned drawings, it is always possible to use other computed values that are available in order to determine the main grounds of the differences.

Dynamic analyses also provide an enormous amount of computed values : just as for static analyses, displacements, pore pressures and effective stresses are computed and eventually kept on hardware disk at each node or integration point and at each time step.

In dynamics, a real accelerogram is described usually with a time step of 0.01 (or 0.02) second. If its duration is 10 s, 1 000 points (and therefore time steps) have to be used in the computation. In addition, velocities and accelerations must be added to the list of the computed values.

Usually all of the computed results are represented in the form of time histories and spectral content.

However, it is almost impossible to compare several time histories by drawing them all on single graph.

Instead, the comparisons ought to show mean or maximum values.

The same type of plotting of curves as those proposed for concrete arch dams ought to allow for the comparisons to be made in a few locations of dam for :

- maximum horizontal and vertical accelerations,
- irreversible, horizontal and vertical displacements, at the end of the earthquake,
- maximum pore pressure,
- final pore pressure,
- location of the maximum pore pressure at the end of an earthquake.

Due to the great variety of methods and thus the data chosen by the different participants, no quantitative comparison was feasible after the first Benchmark Workshop.

Such a comparison can be envisaged for the second BW, for which the specifications provided were more complete and more precise.



---

## 7. CONCLUSIONS

---

Poser et résoudre correctement des problèmes de modèles mathématiques de barrage n'est qu'une part limitée de la mission de l'ingénieur. Celui-ci assume le rôle plus large de concevoir, construire, entretenir et exploiter les grands barrages.

En fait, aucun modèle ne sera jamais capable de représenter complètement l'infinie complexité de la réalité; d'ailleurs, la connaissance des paramètres – qu'ils soient relatifs aux propriétés des matériaux, aux chargements ou aux conditions aux limites – sera toujours limitée.

Cependant, des modèles, même très sommaires, ou à la limite conceptuellement incorrects, peuvent être utilisés par les ingénieurs expérimentés « d'une façon correcte » et avec de bons résultats, tandis que des modèles sophistiqués peuvent être utilisés de façon incorrecte avec des conséquences dangereuses.

Dans ce contexte plus large, notre Comité *ad hoc*, en accord avec l'esprit de sa mission, a choisi de ne traiter qu'un aspect très limité du problème global.

L'idée de base est d'établir une méthodologie qui permette aux utilisateurs de logiciel de barrages de définir plus clairement la validité et les limites des outils de calcul qu'ils utilisent pour résoudre les problèmes de barrage.

Nous sommes partis de l'idée préliminaire que la question centrale de la « validation » d'un logiciel de calcul de barrage est souvent non établie ou sous-estimée.

En conséquence, apparaît un besoin d'exercices d'analyse et de mise en jeu de la validité des logiciels. Ces exercices produisent des résultats et génèrent des discussions dont le contenu doit être mis à la disposition de tous les ingénieurs de barrages intéressés. Il est apparu, en même temps, le besoin de développer des procédures d'assurance qualité qui accompagnent la production de nouveaux logiciels (ou la certification des anciens logiciels).

Notre Comité *ad hoc* a organisé (dans le court laps de temps de deux ans) deux bancs d'essai sur les problèmes de calcul de barrages.

Pour chacune de ces occasions, des thèmes techniques ont été définis et les participants essayèrent de traiter ces thèmes avec les logiciels de leur choix.

Les résultats ont été comparés et discutés de façon à définir, in fine, la « solution de référence » et les « plages d'incertitudes » pour chacun des thèmes techniques.

Bien que cet objectif final n'ait pas pu être complètement atteint, l'expérience ainsi acquise a permis à ce Comité d'évaluer d'une façon plus réaliste les possibilités et les difficultés de ce genre d'exercice.

---

## 7. CONCLUSIONS

---

It is recognized that the ability to set up and solve mathematical models of dam problems is a limited part of the engineering mission, which is concerned with the larger role of conceiving, constructing, maintaining and operating large dams.

In fact, on the one hand, no model will ever be complete in its representation of an infinitely complex reality; besides, knowledge of parameters – be they related to material properties, loads or boundary conditions – will always be limited.

On the other hand, even very crude or, in the limit, conceptually incorrect models could be used “in the right way” and with good results by experienced engineers, while sophisticated models could be used in the wrong way with dangerous results.

In this wider context, our *ad hoc* Committee, in agreement with the spirit of its Terms of Reference, chose to address only a very limited aspect of the overall problem.

In particular, the basic idea is to set up a methodology to allow users of dam software to assess more clearly the validity and limits of the computational tools used to solve dam engineering problems.

The starting consideration was that the central question of “validation” of dam engineering software often goes unstated or underestimated.

There is, therefore, a need for analyzing and bringing into play software validation exercises, making the results and ensuing discussion available to all interested dam engineers. There is also a need to develop, in time, “quality assurance” procedures accompanying the production of new software packages (or the certification of old ones).

Our *ad hoc* Committee set up (in the short time span of two years) two successive Benchmark-Workshop on Computational Problems of Dams.

In each of these events, technical themes were defined and participants tried to treat those with the software package of their choice.

Results were compared and discussed in order, ultimately, to define “reference solution” and “uncertainly bounds” for the solution of each technical theme.

Although this final aim was not completely attained, the experience thus gained allowed this Committee to evaluate in a more realistic way the possibilities and difficulties of this kind of exercise.

C'est de cette expérience qu'est née l'idée de proposer que l'organisation d'un banc d'essai puisse devenir l'objet permanent d'activités patronnées par la CIGB et que, dans ce cadre, la responsabilité spécifique de notre Comité *ad hoc* puisse être précisée.

Une meilleure stratégie à long terme a donc été engagée pour les toutes prochaines années dans le but d'améliorer la mentalité avec laquelle les outils de calcul sont utilisés par les ingénieurs de barrage.

Il a été constaté qu'un banc d'essai annuel ne laissait pas assez de temps pour permettre une préparation, une participation et une analyse de plus en plus approfondie des résultats, qui soient satisfaisantes.

On a conclu également qu'une petite équipe technique permanente devait être mobilisée pour réaliser la comparaison critique en profondeur des résultats, l'exploitation des différences entre les résultats des participants, et l'établissement des « solutions de référence » et des plages d'incertitudes.

Les possibilités de mobiliser et de financer ces équipes techniques permanentes ont été identifiées et discutées.

Ces considérations nous ont conduits à proposer à court terme un banc d'essai tous les deux ans associé à une diffusion plus précoce des thèmes techniques.

De cette manière, la réception en temps utile des présentations de calcul et leur examen critique par l'équipe technique permanente peuvent être réalisées suffisamment tôt pour qu'une vraie synthèse des résultats puisse être présentée pendant l'atelier. Cette synthèse peut alors être discutée en détail entre les participants.

Grâce à cela, des documents finaux de première qualité peuvent être produits et ceux-ci pourront être publiés comme Bulletin de la CIGB (ou sous toute autre forme qui paraîtrait préférable), de façon à servir de référence à tous les ingénieurs de barrages concernés par les problèmes de calcul.

Il a été aussi considéré que, sur chaque thème technique, deux niveaux de difficultés des calculs seraient définis : l'un « facile » qui soit accessible aux logiciels déjà utilisés couramment par l'ingénieur de barrage en général, l'autre « difficile » qui s'adresse aux ingénieurs qui ont plus l'esprit à chercher ou aux universitaires.

De cette façon, on pourra y trouver deux sources d'intérêt (et on peut espérer une interaction entre les deux, en gardant à l'esprit que les méthodes avancées d'aujourd'hui peuvent devenir les outils courants de demain, tandis que les besoins non satisfaits des ingénieurs d'aujourd'hui peuvent inspirer le contenu de programmes de recherche et provoquer leur lancement).

Bien sûr, de la même manière que les idées initiales ont été modifiées par les deux premières expériences, les leçons tirées des bancs d'essais successifs conduiront vraisemblablement à faire évoluer la stratégie par des décisions successives de façon à maintenir la flexibilité qui permettra de rendre le meilleur service à la profession.

Nous avons essayé dans ce Bulletin de la CIGB, d'exposer les idées de base, le besoin et les principes fondamentaux de la « validation » des logiciels utilisés par les ingénieurs de barrages.

In this light, the initial idea of proposing that the holding of computational Benchmark-Workshops should become a permanent feature of ICOLD-promoted activities and the special responsibility of our *ad hoc* Committee could be refined.

A better long-term strategy was thus evolved for the next few years, with the final goal of changing for the better the mentality with which computational tools are used by dam engineers.

It was seen that an annual event allowed too short a time to ensure adequate preparation, participation and successive in-depth analysis of results.

It was also concluded that a small permanent technical staff should be set up to carry out the in-depth critical comparison of results, the explanation of differences among participants and the drawing up of "reference solutions" and uncertainty bands.

Possibilities for setting up and funding this permanent technical staff were identified and discussed.

These considerations led us to propose for the near-term future a biennial event, with early diffusion of Technical Themes.

In this way timely reception of papers, and their critical examination by the permanent Technical Staff, could be ensured with adequate time to be able to present a real synthesis of results during the actual meeting. The latter could thus be devoted to detailed discussion among participants.

From all this, final documents of high quality could be produced, and these could eventually be published as ICOLD Bulletins (or in any other form as it could appear suitable), to become reference works for dam professionals concerned with computational problems.

Also, for each Technical Theme it is considered that two level of computational problems should be defined: an "easy" level accessible to software package already in routine use by average dam professionals, and a "difficult" one suitable for advanced treatment by more research-minded or academic people.

In this way both kinds of interest could be attracted (and hopefully made to interact, keeping in mind that the advanced methods of today can become the routine tools of tomorrow, in the same way as the unfulfilled needs of today's practitioners should inspire the research programs now being devised and launched).

Of course, in the same way as the initial ideas were modified by the first two actual experiences, the feedback from successive Benchmark-Workshop events could presumably modify and shape our successive decisions and strategies, which will have to be kept flexible in order to serve in the best way the interests of our profession.

We tried, in the present ICOLD Bulletin, to set out the background ideas, the need and the basic principles for "validation" of software used in dam engineering.

Après avoir évalué les difficultés très sérieuses que soulèverait un traitement rigoureux de notre sujet, nous avons été progressivement conduits à recommander une procédure pratique progressive qui repose sur la définition de bancs d'essais standards, sur la base desquels sont tenus des ateliers internationaux, et à établir et publier les solutions standards acceptées.

Les contraintes pratiques et les exigences ont été établies grâce à l'organisation, à un bref intervalle, de deux bancs d'essais internationaux.

En conséquence, nous nous sentons maintenant capables de proposer une organisation précise et une procédure qui, le moment venu et avec un bon accueil et une saine confiance de la profession, permettra d'estimer la qualité des résultats de calcul de barrages.

Cette action servira toutes les parties engagées, que ce soient les ingénieurs de projet, les chercheurs, les experts, les organismes financiers, les autorités de contrôle, les maîtres d'ouvrage et finalement la société dans son ensemble.

\*

\*   \*

Nous remercions vivement les Organismes suivants pour leur précieuse contribution à la préparation du Bulletin :

- COYNE ET BELLIER, 9, allée des Barbanniers, 92632 GENNEVILLIERS cedex,
- ENEL S.p.A., Via G. B. Martini 3, 00198 ROMA,
- HARZA ENGINEERING, 233 South Wacker Drive, CHICAGO, ILLINOIS 60606-6392,
- ISMES S.p.A., Via G. Cesare, 29, 24100 BERGAMO.

Tous ces Organismes ont participé activement aux réunions du Comité, au cours desquelles le Bulletin a été élaboré et discuté; ils ont toujours réservé un chaleureux accueil aux membres du Comité et entretenu des relations amicales et fructueuses, essentielles à la réussite de nos travaux.

From consideration of the very serious difficulties implied by a rigorous treatment of our subject, we were gradually led to recommend an ongoing practical procedure of defining standard benchmarks, on which to hold international workshops, and of establishing and publishing the accepted standard benchmark solutions.

The practical constraints and necessities were ascertained through actually carrying out, in very short succession, two international Benchmark-Workshops.

As a consequence, we now feel able to propose a definite organization and procedure that will, in due time and with general acceptance and adoption by the profession, ensure an increase in the standards of computer solutions for problems in dam analysis.

This will help to serve all parties involved, including the design engineer, the research worker, the dam expert, the financing and controlling authorities, the dam owner, and in the last analysis society in general.

\*  
\*   \*

We gratefully acknowledge the support given by the following Societies :

- COYNE ET BELLIER, 9, allée des Barbanniers, 92632 GENNEVILLIERS cedex,
- ENEL S.p.A., Via G. B. Martini 3, 00198 ROMA,
- HARZA ENGINEERING, 233 South Wacker Drive, CHICAGO, ILLINOIS 60606-6392,
- ISMES S.p.A., Via G. Cesare, 29, 24100 BERGAMO.

All of the above Societies freely contributed qualified, valuable participation in the Committee meetings during which the present Bulletin was written and reviewed; they always extended warm hospitality to the members of the Committee and fostered an atmosphere of mutual understanding and friendship that was vital to the success of our endeavours.

---

## 8. REFERENCES

---

1. NAFEMS, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow G75OQU, United Kingdom.
2. Arch Dams - A Review of British Research and Development, Proceedings of the Symposium held at the Institute of Civil Engineers, London, March 1968.
3. Norme AFNOR Z61-102, Vocabulaire de la qualité du logiciel, juillet 1985.
4. Norme AFNOR X50-109, gestion de la qualité - vocabulaire, (juillet 1985).
5. Recommandation de plan qualité logiciel, publié par l'AFCIQ 15/05/86.
6. Guide de rédaction d'un plan qualité logiciel, publié par l'AFCIQ 15/05/86.
7. IEEE Std 729-1983, IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology.
8. IEEE Std 829-1983, IEEE Standard for Software Test Documentation.

**FIGURES 1 TO 20 / FIGURES 1 À 20**



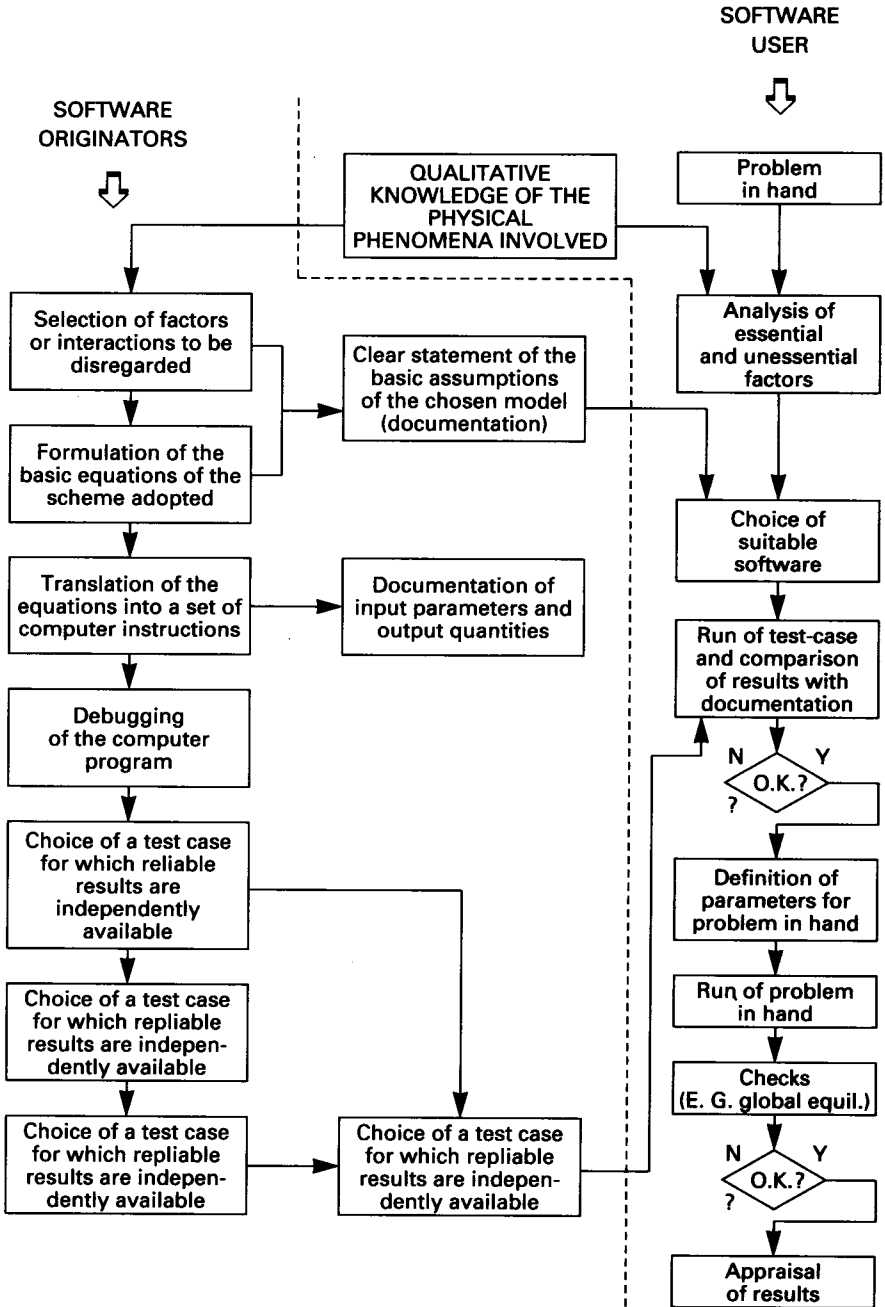


Fig. 1

Flow-diagram of sections for software originators and software users, in relation to a computational analysis procedure for a generic dam problem

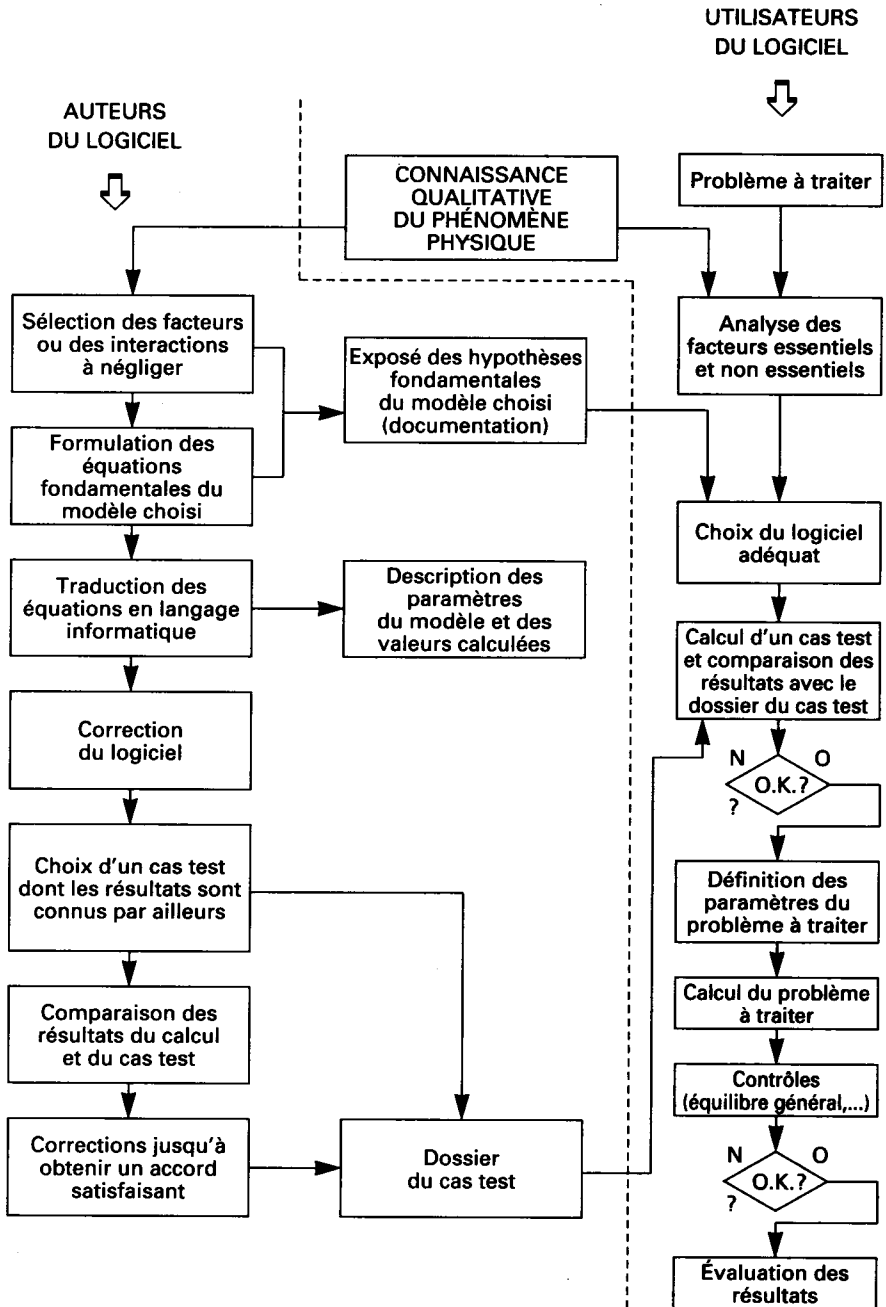


Fig. 1

Diagramme d'actions pour des auteurs et des utilisateurs de logiciel, en relation avec une procédure d'analyse informatique d'un problème de barrage

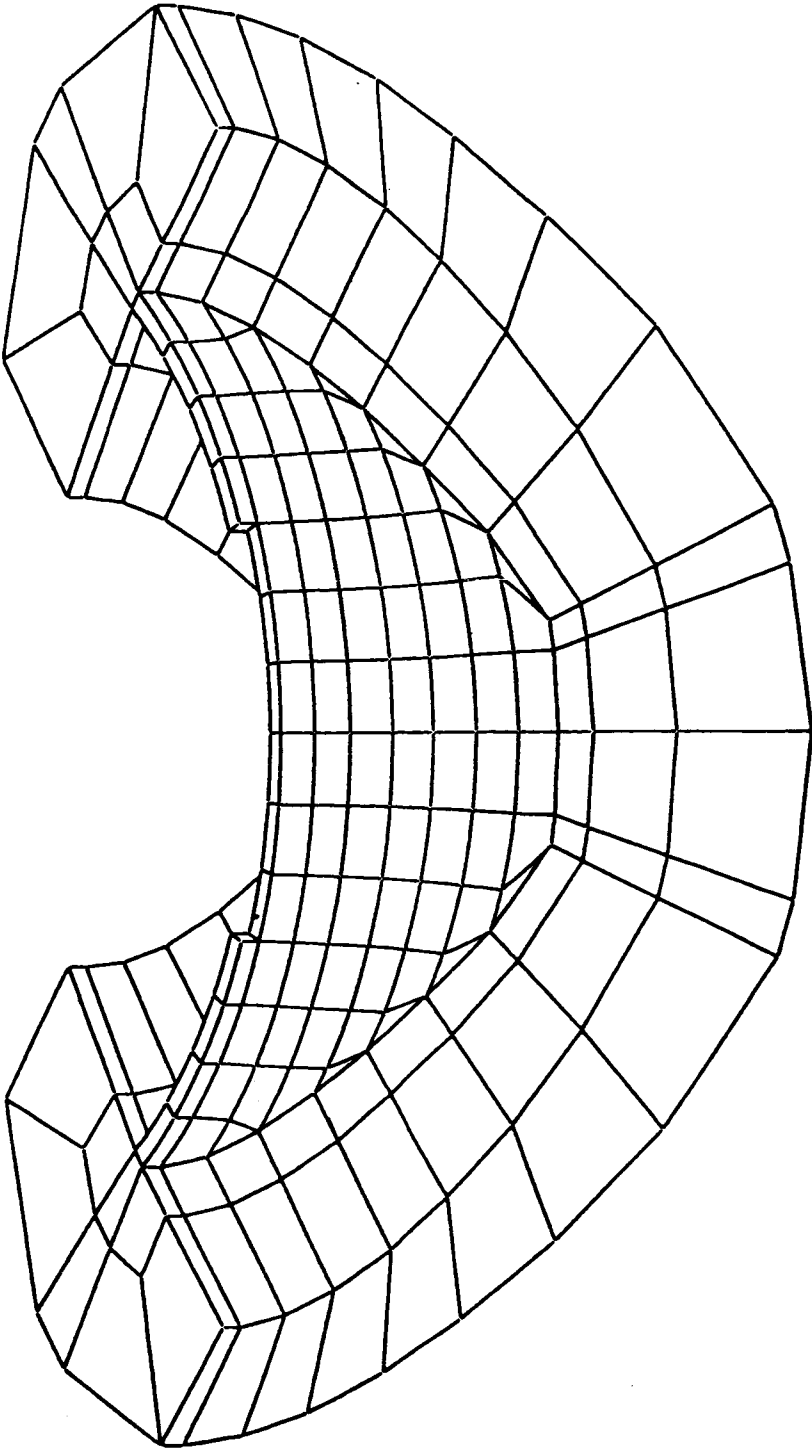


Fig. 2

Talvacchia arch dam

Finite element mesh of the dam and rock foundation - Upstream view

*Barrage-voûte de Talvacchia*

*Maillage d'éléments finis du barrage et de la fondation rocheuse - Vue d'amont*

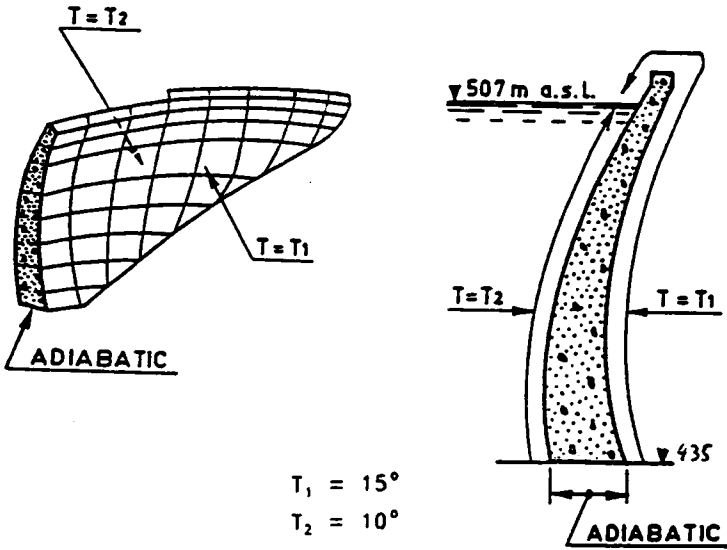


Fig. 3 a

Talvacchia arch dam  
 Thermal analysis - Steady state  
*Barrage-voûte de Talvacchia*  
 Analyse thermique - État permanent

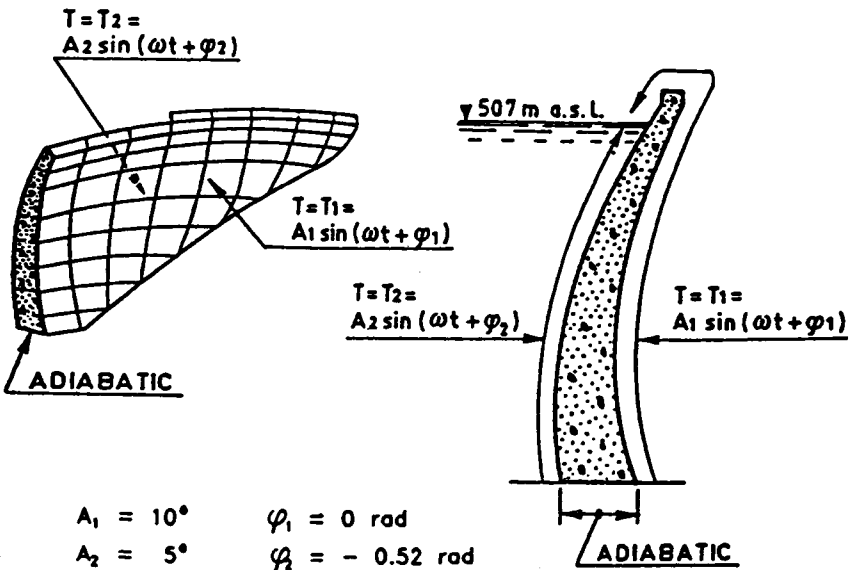


Fig. 3 b

Talvacchia arch dam  
 Thermal analysis - Periodic state  
*Barrage-voûte de Talvacchia*  
 Analyse thermique - État périodique

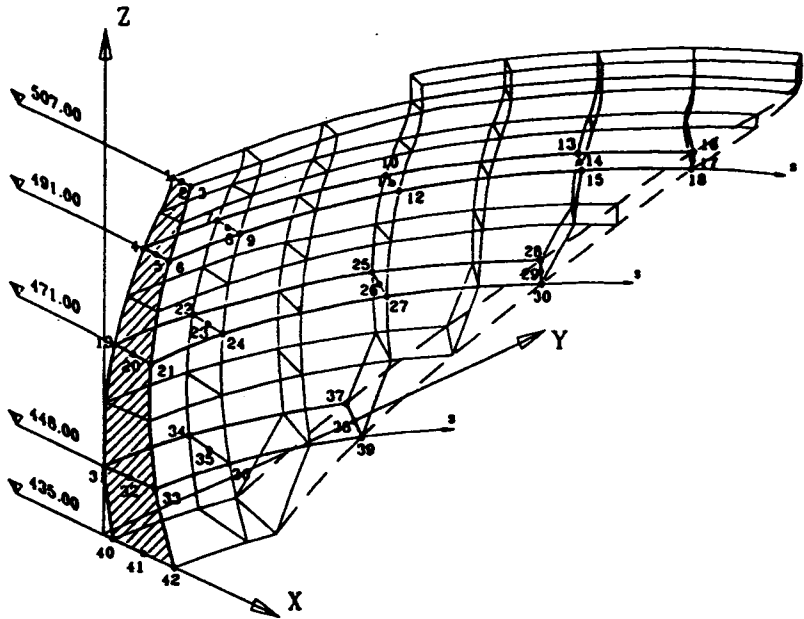


Fig. 4 a

Talvacchia arch dam

Dam analysis - Position of the nodes at which the results should be presented

*Barrage-voûte de Talvacchia*

*Calcul du barrage - Situation des nœuds où les résultats seront présentés*

Points	s (m)	Displ.x (m)	Displ.y (m)	Displ.z (m)	P1	P2	P3
1	0.0						
2	0.0						
3	0.0						
4	0.0						
5	0.0						
6	0.0						
7	16.0						
8	16.0						
9	16.0						
10	48.0						
11	48.0						
12	48.0						
13	80.0						
14	80.0						
15	80.0						
16	99.2						
17	99.2						
18	99.2						
19	0.0						
20	0.0						
21	0.0						
22	16.0						
23	16.0						
24	16.0						
25	48.0						
26	48.0						
27	48.0						
28	75.0						
29	75.0						
30	75.0						
31	0.0						
32	0.0						
33	0.0						
34	16.0						
35	16.0						
36	16.0						
37	41.5						
38	41.5						
39	41.5						
40	0.0						
41	0.0						
42	0.0						

Fig. 4 b

Talvacchia arch dam  
 Dam analysis - Table presenting the results

*Barrage-voûte de Talvacchia  
 Calcul du barrage - Tableau de présentation des résultats*

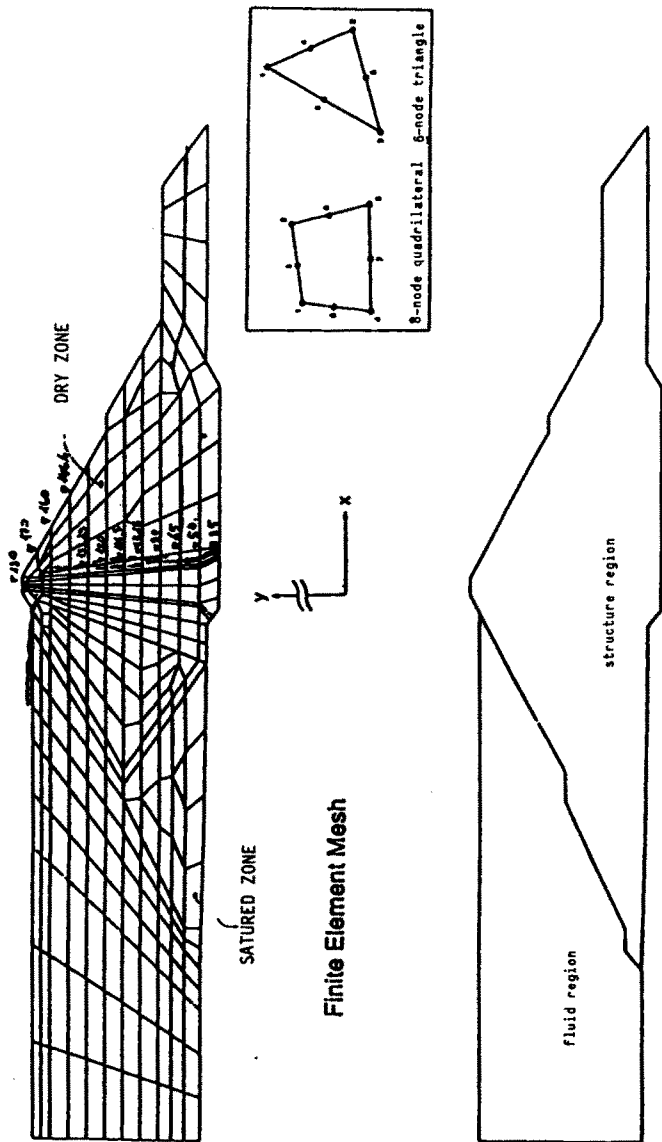


Fig. 5

El Infiernillo embankment dam  
 Finite element mesh  
 Barrage en remblai d'El Infiernillo  
 Maillage d'éléments finis

- |                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Saturated zone       | Zone saturée           |
| Dry zone             | Zone sèche             |
| 8-node quadrilateral | Quadrilatère à 8 nœuds |
| 6-node triangle      | Triangle à 6 nœuds     |
| Fluid region         | Zone du fluide         |
| Structure region     | Zone de l'ouvrage      |

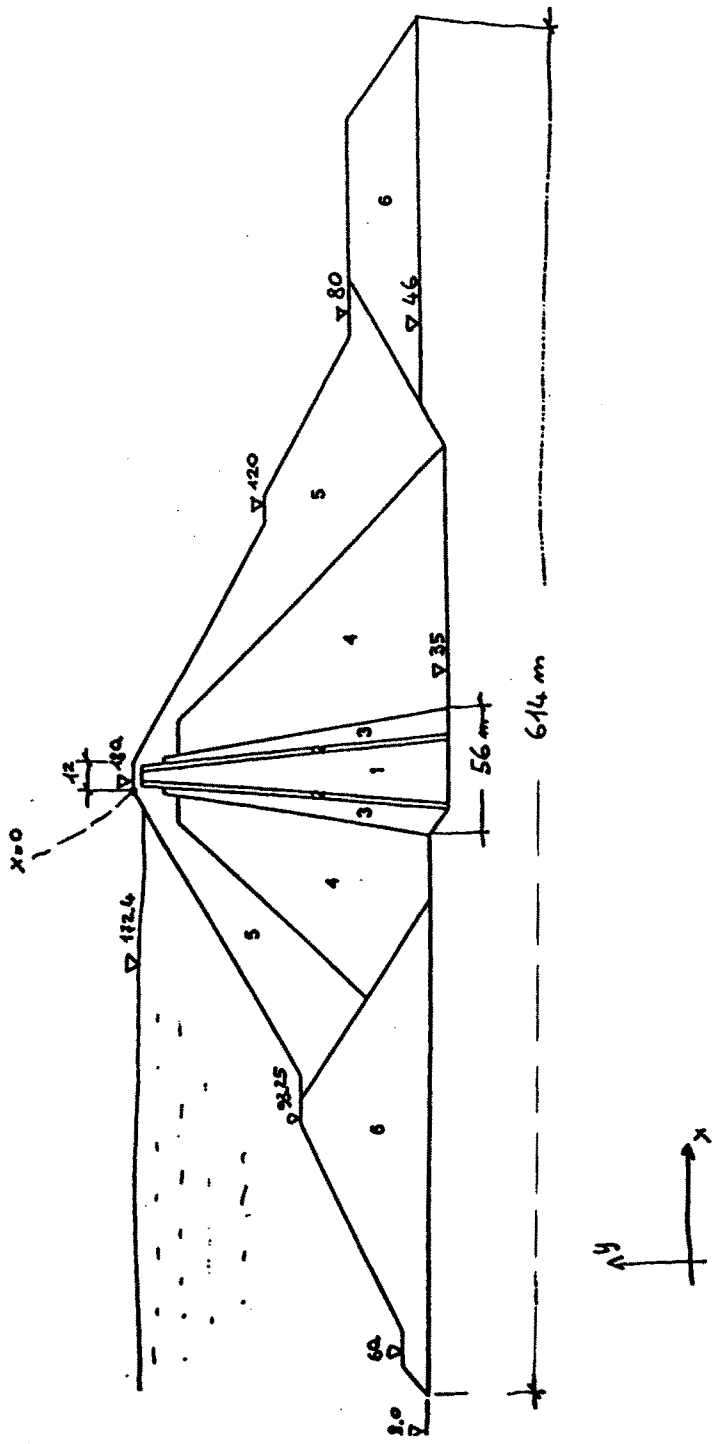


Fig. 6

El Infiernillo embankment dam  
 Material property zones  
*Barraje en remblai d'El Infiernillo*  
*Zones de matériaux de propriétés différentes*



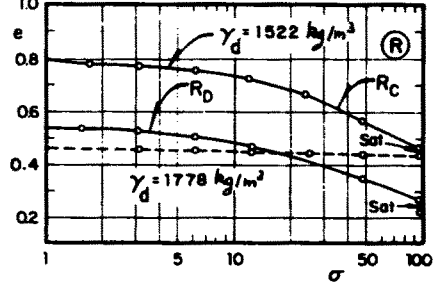
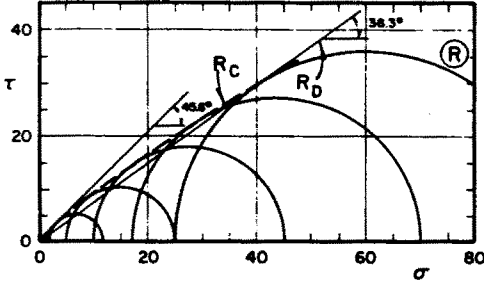
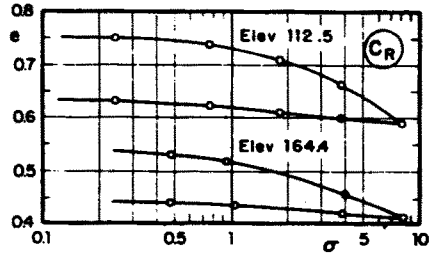
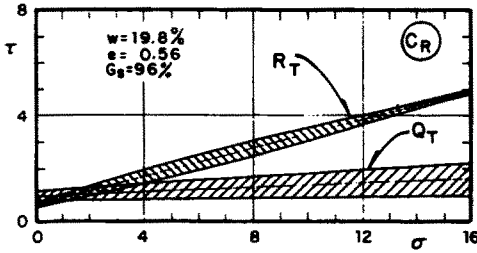
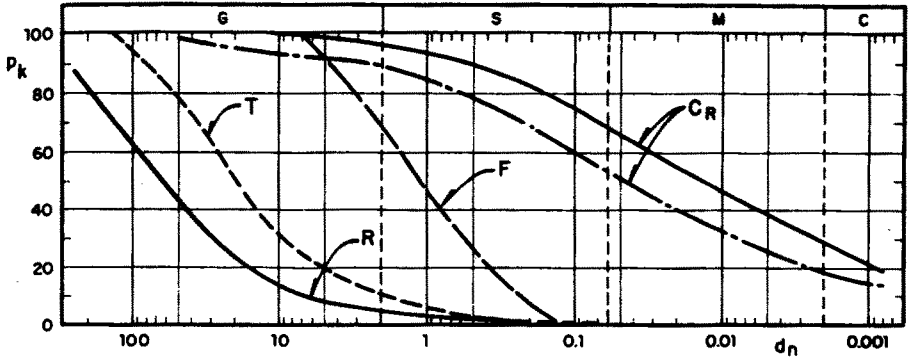


Fig. 7

El Infiernillo embankment dam - Mechanical properties of materials for the dam  
*Barrage en remblai d'El Infiernillo - Propriétés mécaniques des matériaux du barrage*

G	Gravel	G	Gravier
S	Sand	S	Sable
M	Silt	M	Silt
C	Clay	C	Argile
C <sub>R</sub>	Core	C <sub>R</sub>	Noyau
F	Filters	F	Filtres
T	Transition zones	T	Zones de transition
R	Rockfill	R	Enrochement
p <sub>k</sub>	Per cent finer	p <sub>k</sub>	Pourcentage d'éléments passant
d <sub>n</sub>	Nominal diameter, in mm	d <sub>n</sub>	Diamètre nominal (mm)
w	Water content, in per cent	w	Teneur en eau (%)
e	Void ratio	e	Indice des vides
τ	Shear strength, in kg/cm <sup>2</sup>	τ	Résistance au cisaillement (kg/cm <sup>2</sup> )
σ	Normal stress or applied pressure, in kg/cm <sup>2</sup>	σ	Contrainte normale ou pression appliquée (kg/cm <sup>2</sup> )
Elev.	Elevation, in m	Elev.	Cote (m)
γ <sub>d</sub>	Dry unit weight, in kg/m <sup>3</sup>	γ <sub>d</sub>	Poids volumique du sol sec (kg/m <sup>3</sup> )
G <sub>s</sub>	Degree of saturation, in per cent	G <sub>s</sub>	Degré de saturation (%)
R <sub>T</sub>	R-tests (consolidated-undrained)	R <sub>T</sub>	Essais R (consolidés - non drainés)
Q <sub>T</sub>	Q-tests (unconsolidated-undrained)	Q <sub>T</sub>	Essais Q (non consolidés - non drainés)
R <sub>C</sub>	Silicified conglomerate	R <sub>C</sub>	Conglomérats siliceux
R <sub>D</sub>	Diorite	R <sub>D</sub>	Diorite
Sat.	Saturation	Sat.	Saturation

G-Gamma Curve

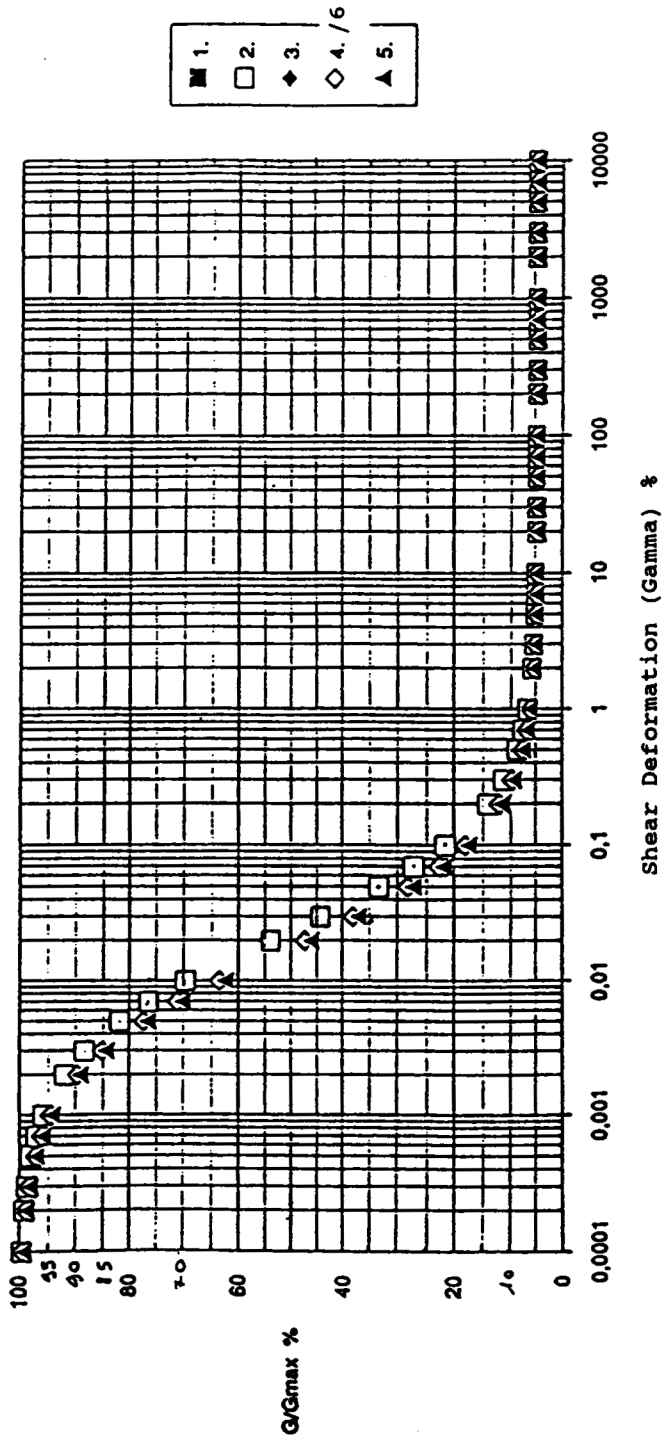


Fig. 8

Variation of shear modulus with shear deformation

Variation du module de cisaillement en fonction de la déformation de cisaillement

Damping - Deformation

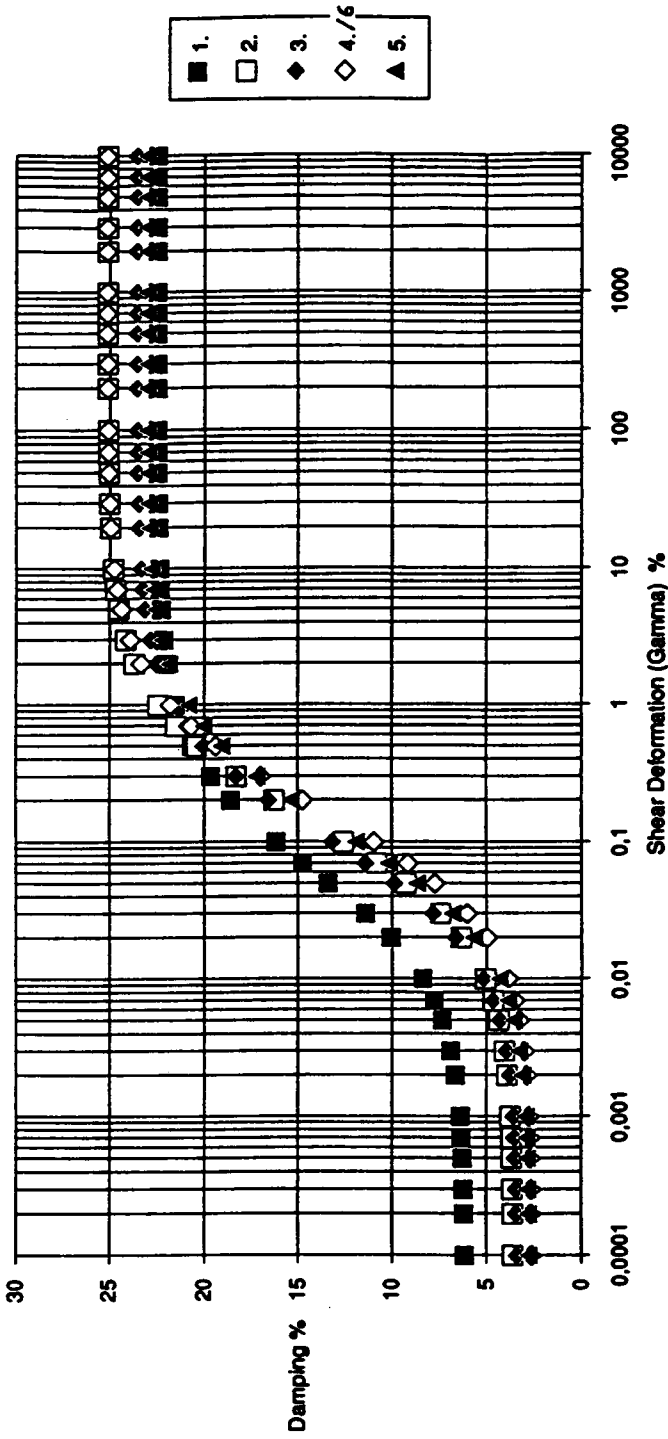


Fig. 9

Variation of damping with shear deformation

Variation de l'amortissement en fonction de la déformation de cisaillement

EQ1.DAT : Record at base rock, 1979

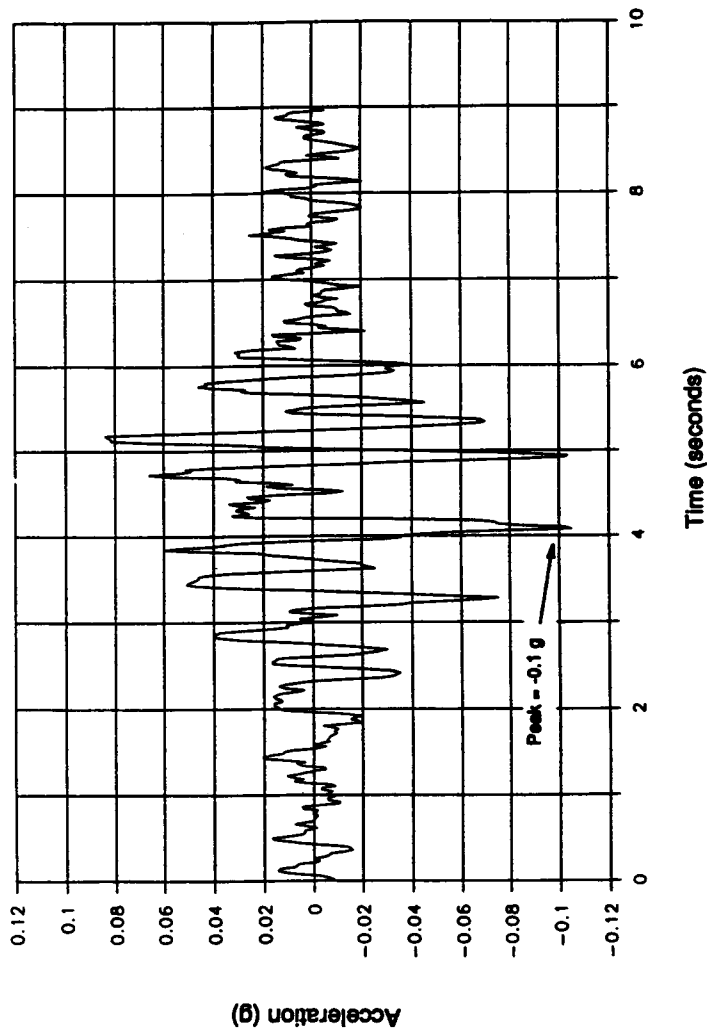


Fig. 10 a

El Infiernillo dam  
EQ1.DAT : Accelerogram at base rock during the March 14, 1979, seismic event  
*Barrage d'El Infiernillo*  
EQ1.DAT : Accélérogramme au niveau du rocher de fondation, lors du séisme du 14 mars 1979

EQ2.DAT : Record at base rock, 1985

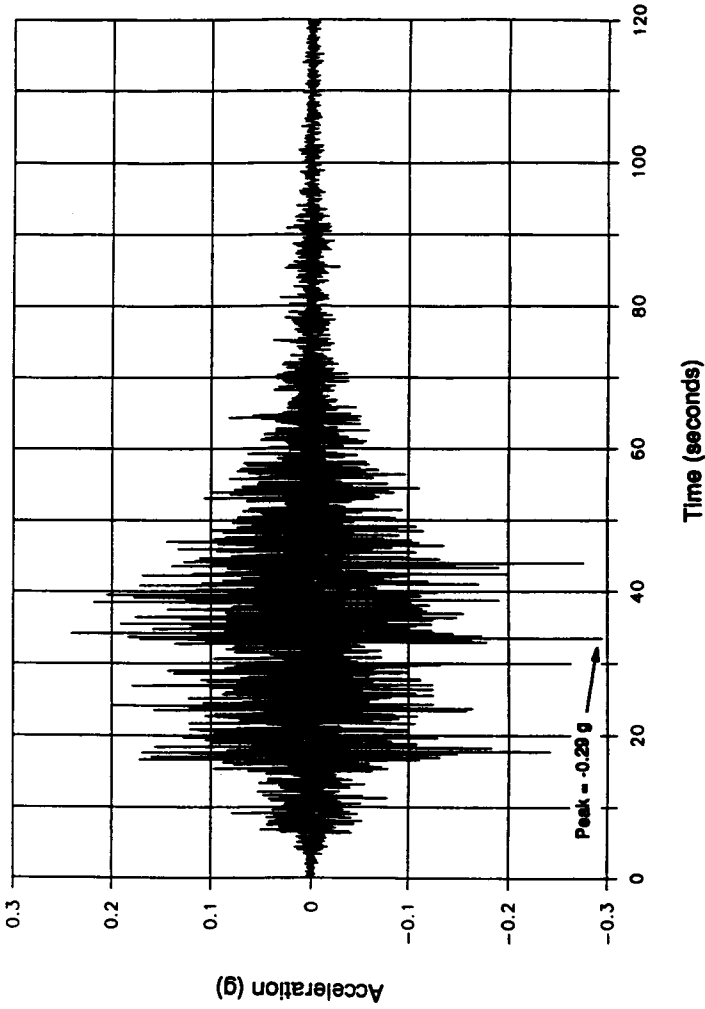


Fig. 10 b

El Infiernillo dam  
EQ2.DAT : Accelerogram at base rock during the September 19, 1985, seismic event  
*Barrage d'El Infiernillo*

*EQ2.DAT : Accélérogramme au niveau du rocher de fondation, lors du séisme du 19 septembre 1985*

EQ3.DAT : HSK record

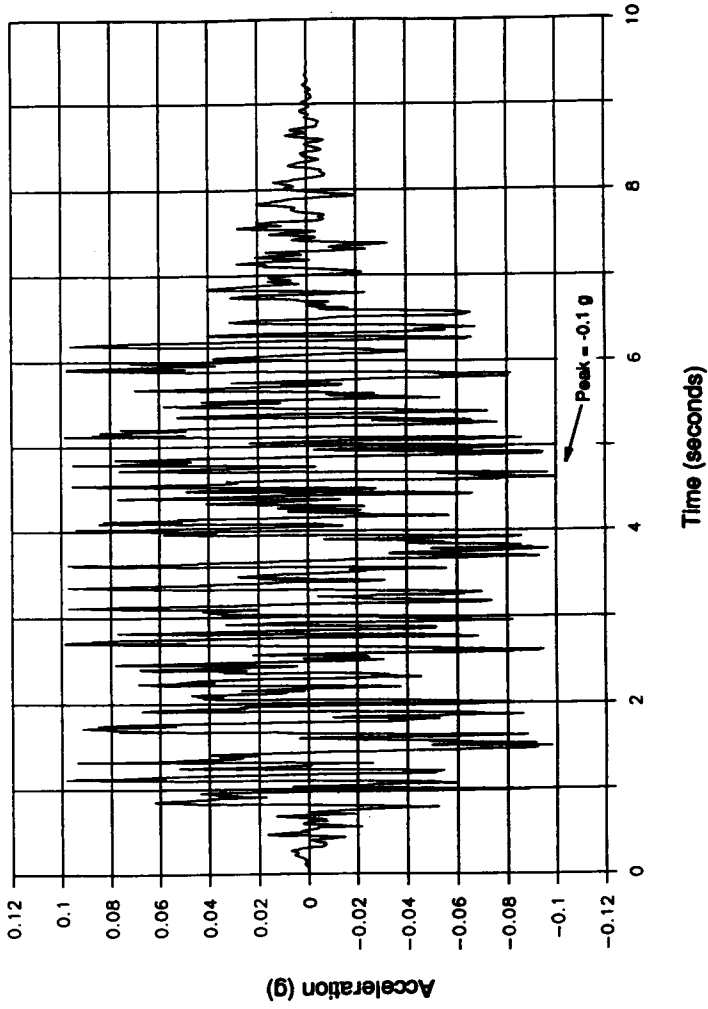


Fig. 10 c

EQ3.DAT : Swiss standard HSK accelerogram  
EQ3.DAT : Accélérogramme standard suisse HSK

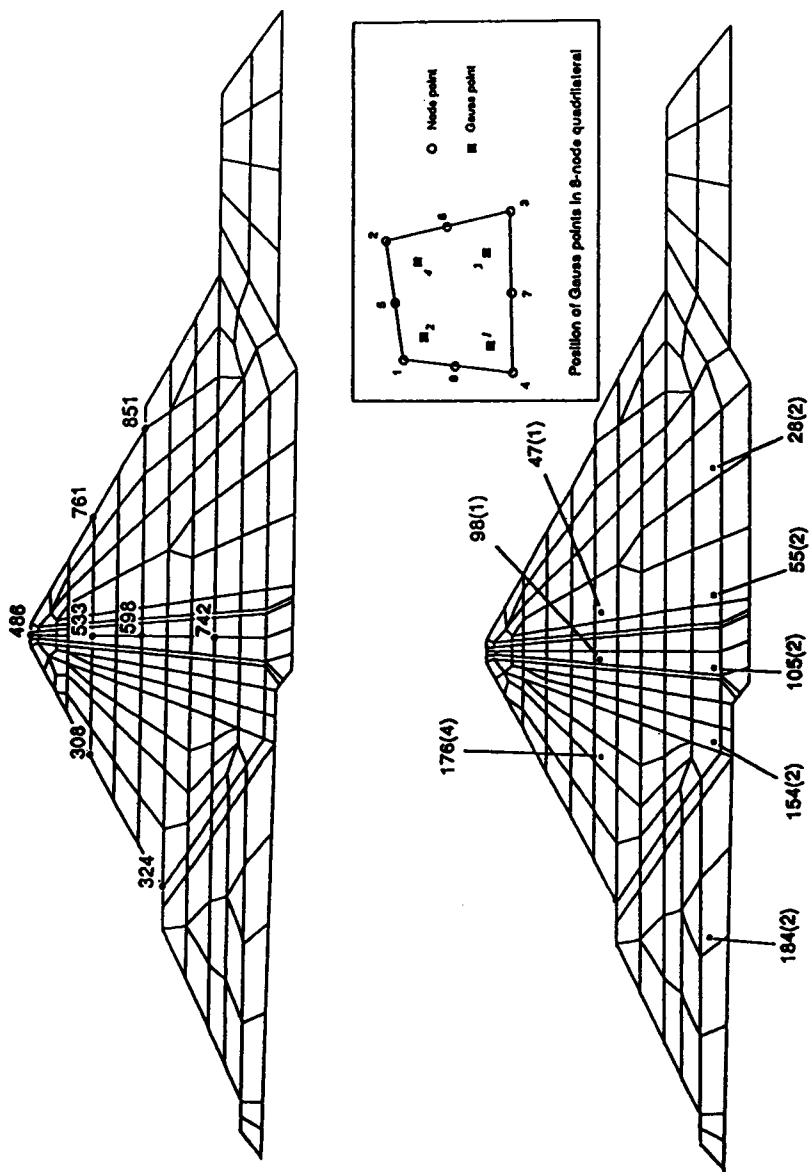


Fig. 11 a

Node and Gauss points for result presentation  
 Position of Gauss points in 8-node quadrilateral

*Nœuds et points de Gauss pour la présentation des résultats*  
*Position des points de Gauss dans le quadrilatère à 8 nœuds*



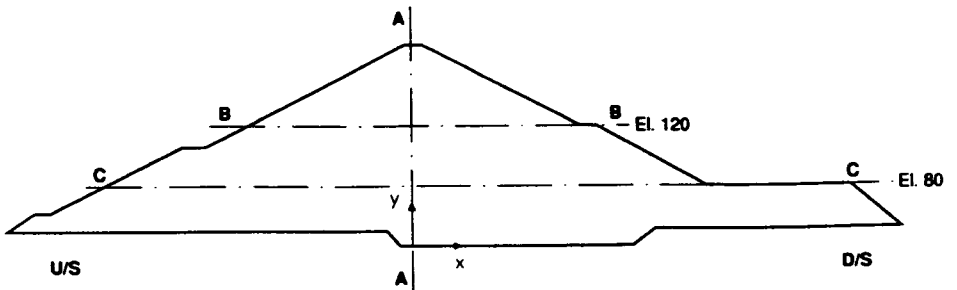
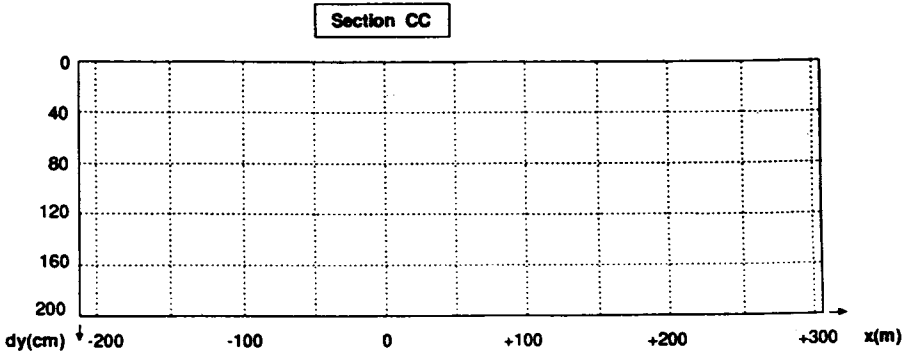
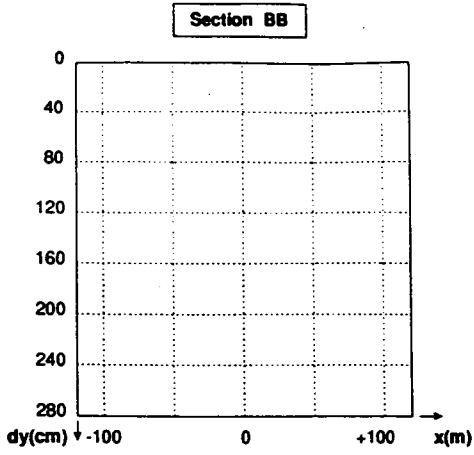


Fig. 11 b

Static analysis - Template for the settlements at the end of the consolidation phase  
*Calcul statique - Figures prototypes pour les tassements à la fin de la phase de consolidation*

	Points of the Dam Section				
	CC	CM	CL	UM	DM
End of Construction					
End of Impounding					
End of Consolidation					

Horizontal Displacements ( $10^{-2}$  m)

	Points of the Dam Section				
	CC	CM	CL	UM	DM
End of Construction					
End of Impounding					
End of Consolidation					

Vertical Displacements ( $10^{-2}$  m)

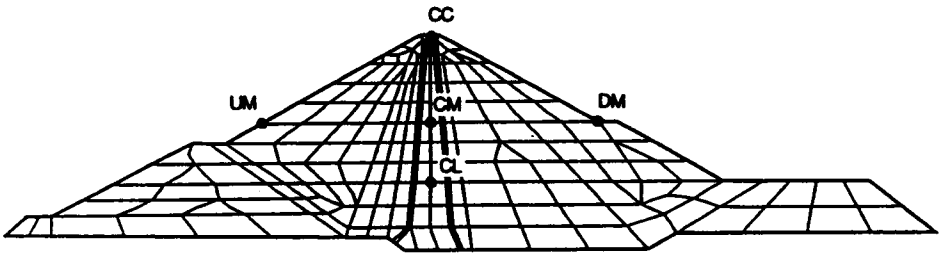


Fig. 11 c

Static analysis - Results of displacements after each phase  
*Calcul statique - Résultats des déplacements après chaque phase*

Points of the dam section  
 End of construction  
 End of impounding  
 End of consolidation  
 Horizontal displacements ( $10^{-2}$  m)  
 Vertical displacements ( $10^{-2}$  m)

*Points dans la section du barrage  
 Fin de construction  
 Fin de remplissage  
 Fin de consolidation  
 Déplacements horizontaux ( $10^{-2}$  m)  
 Déplacements verticaux ( $10^{-2}$  m)*

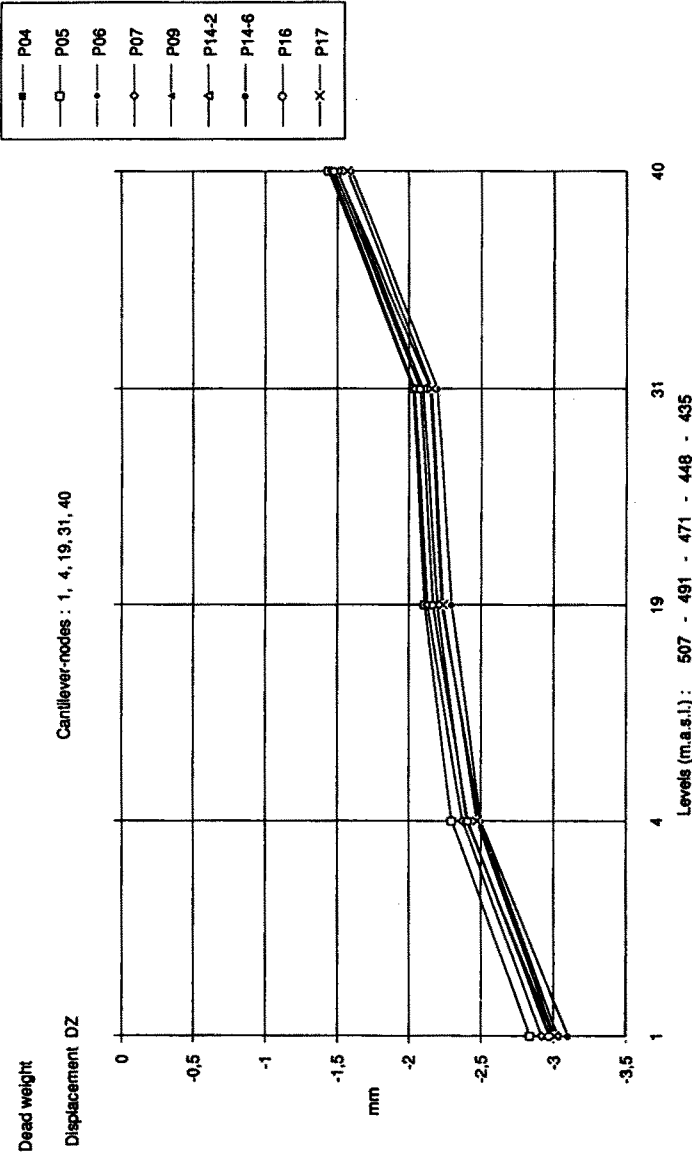


Fig. 12

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Cantilever - nodes : 1, 4, 19, 31, 40  
 Levels (m.a.s.l.) : 507, 491, 471, 448, 435

Console - nœuds : 1, 4, 19, 31, 40  
 Niveaux (m au-dessus du niveau de la mer) : 507,  
 491, 471, 448, 435

Dead weight  
 Displacement DZ

Poids mort  
 Déplacement DZ

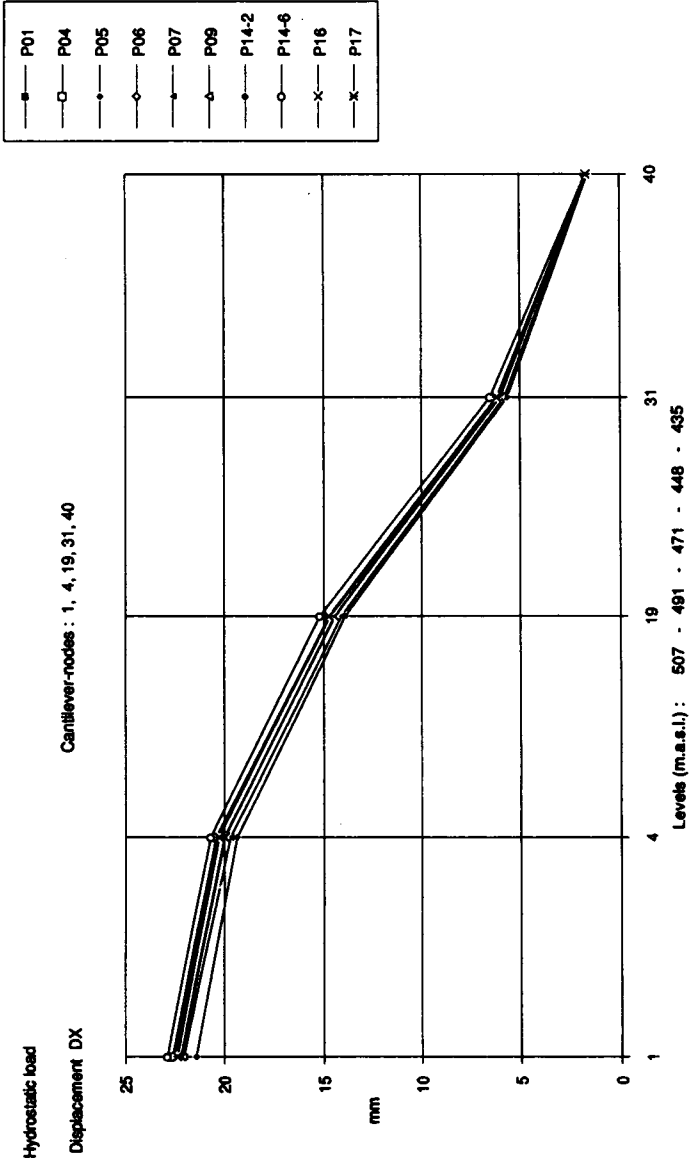


Fig. 13

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Hydrostatic load  
Déplacement DX

Charge hydrostatique  
Déplacement DX

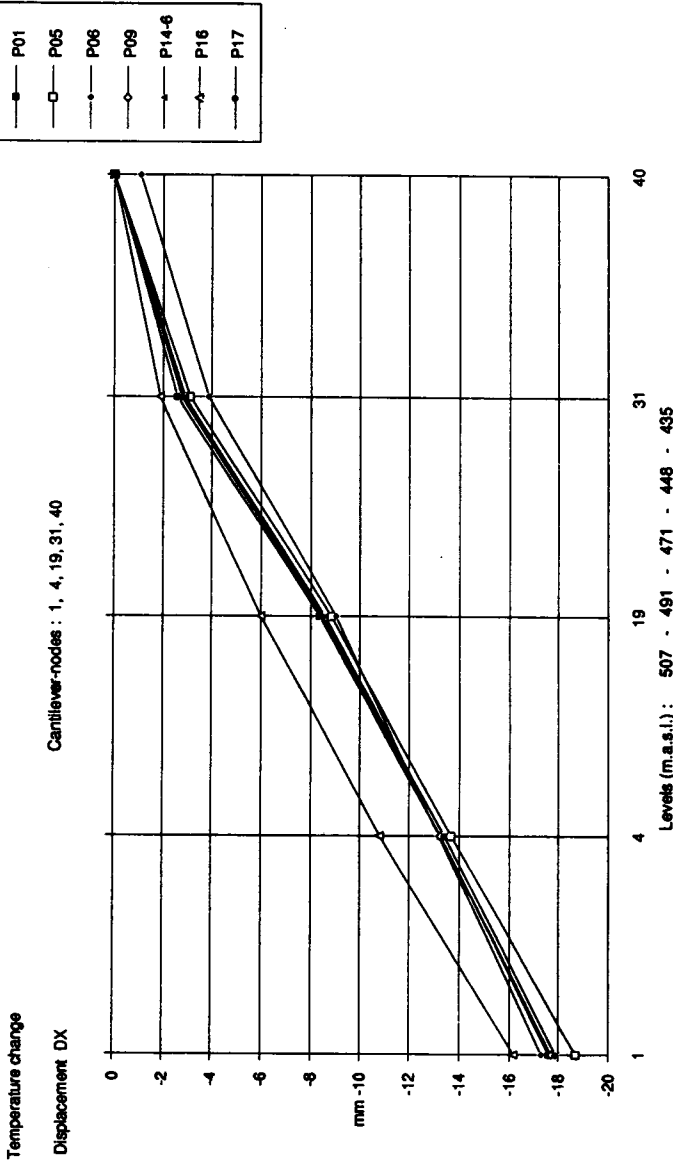


Fig. 14

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Temperature change  
Déplacement DX

Variation de température  
Déplacement DX

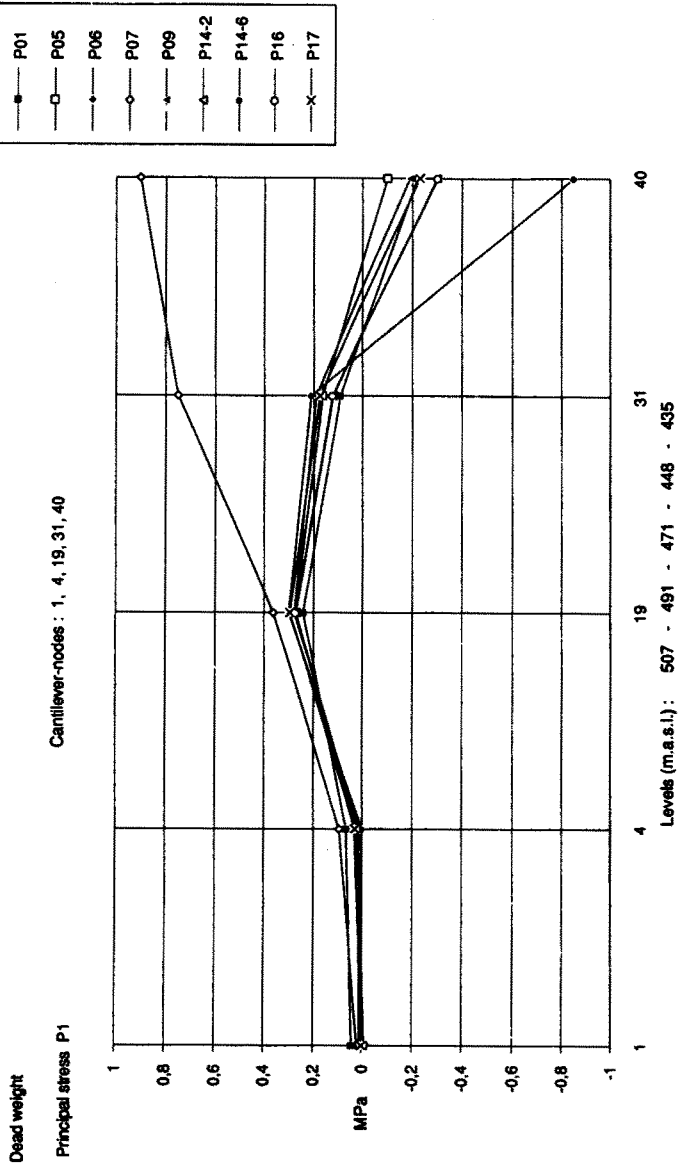


Fig. 15

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Dead weight  
Principal stress  $P_1$

Poids mort  
Contrainte principale  $P_1$

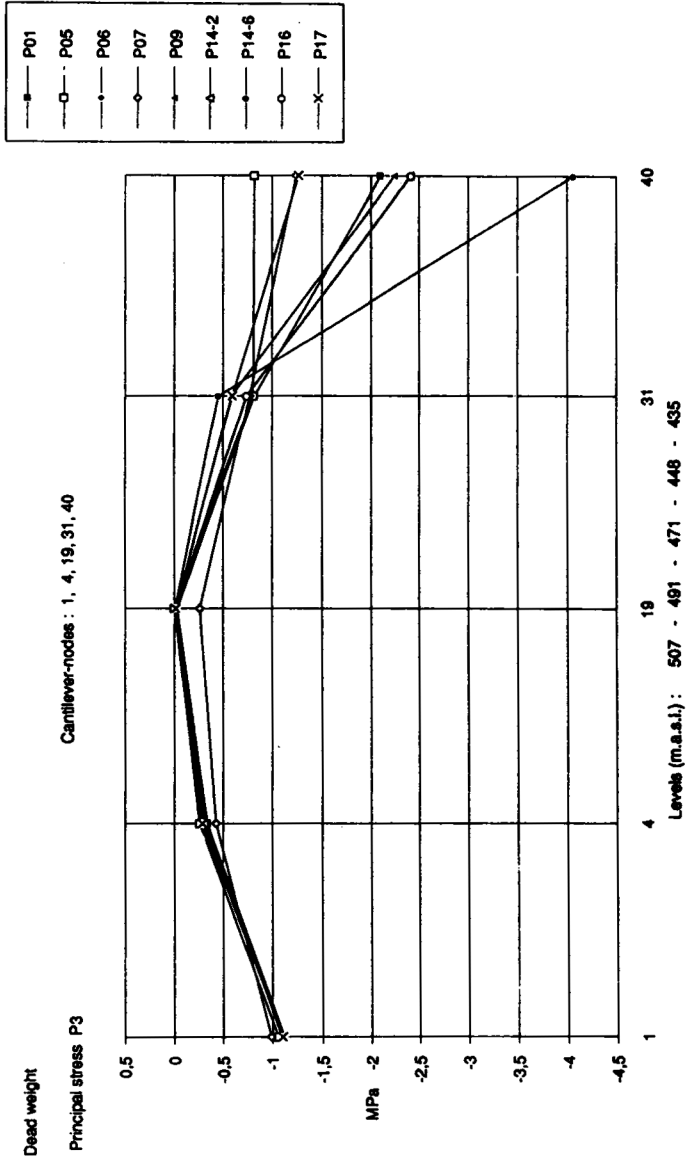


Fig. 16

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Dead weight  
 Principal stress  $P_3$

Poids mort  
 Contrainte principale  $P_3$

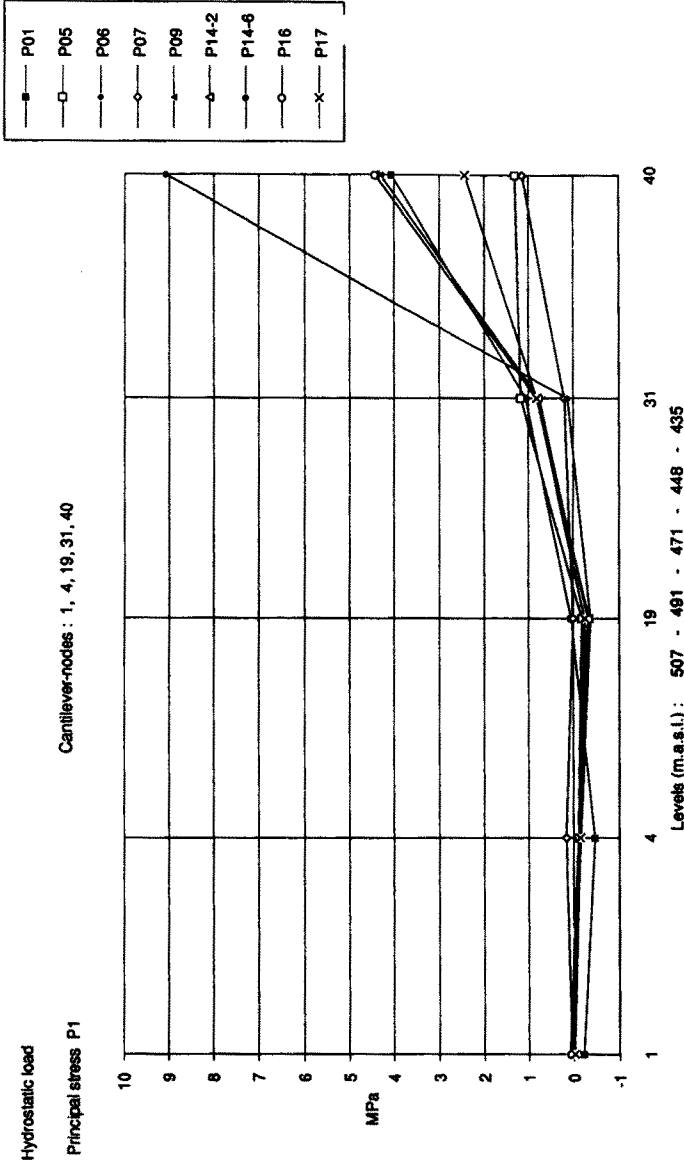


Fig. 17

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Hydrostatic load  
Principal stress P<sub>1</sub>

Charge hydrostatique  
Contrainte principale P<sub>1</sub>



23/5/91 20:39

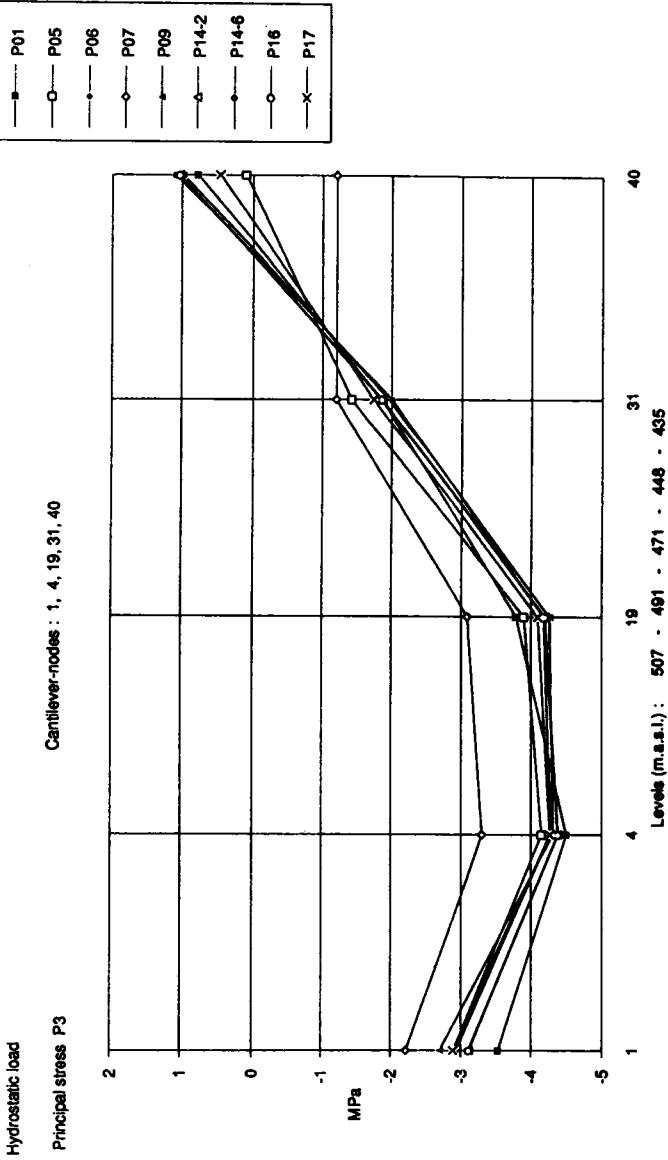


Fig. 18

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Hydrostatic load  
Principal stress  $P_3$

Charge hydrostatique  
Contrainte principale  $P_3$

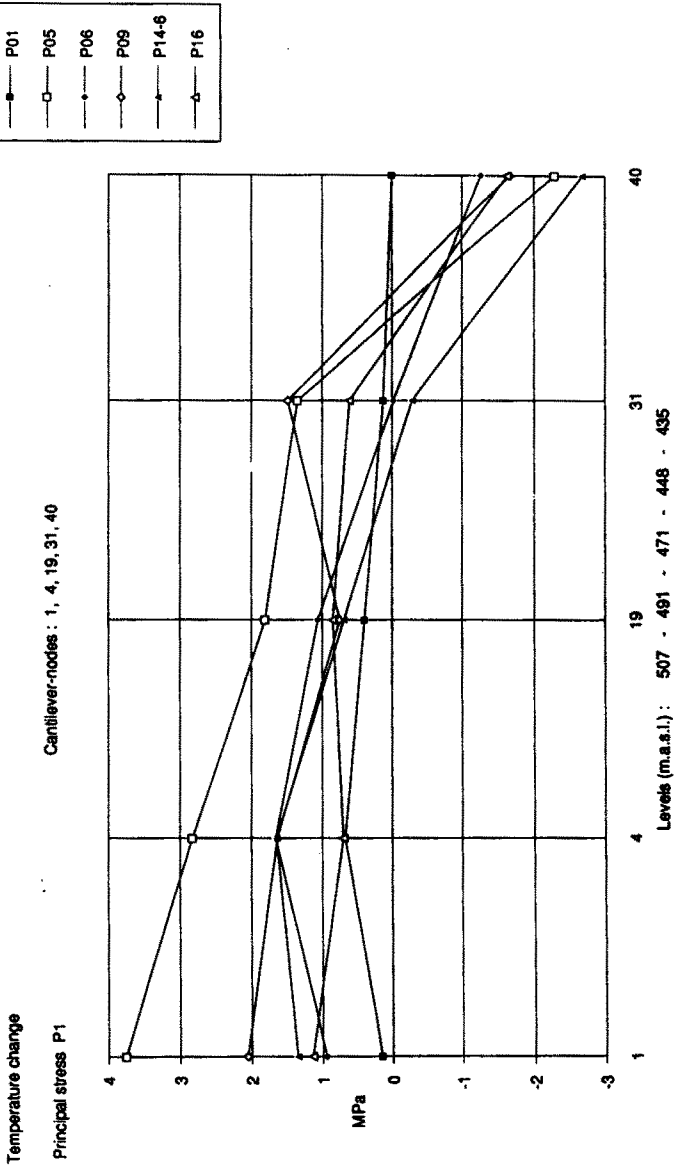


Fig. 19

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)

*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Temperature change  
Principal stress P<sub>1</sub>

Variation de température  
Contrainte principale P<sub>1</sub>

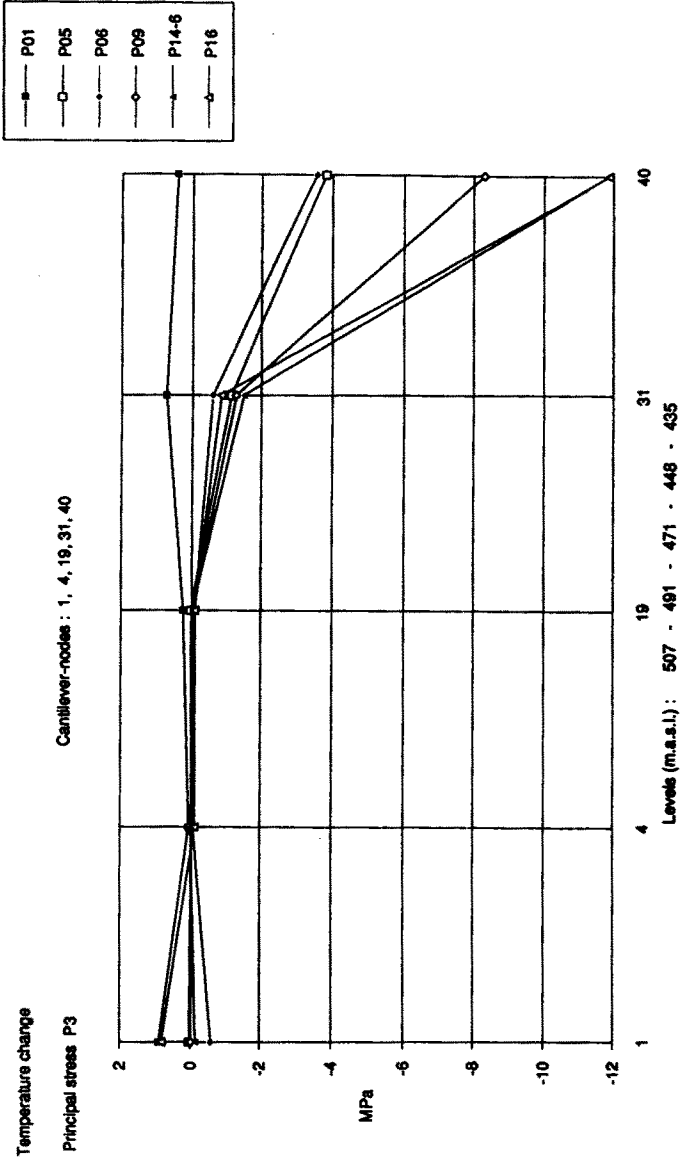


Fig. 20

Example of presentation of results for a typical benchmark-workshop : Theme A (concrete arch dam)  
*Exemple de présentation des résultats d'un banc d'essai type : Thème A (barrage-voûte en béton)*

Temperature change  
Principal stress P<sub>3</sub>

Variation de température  
Contrainte principale P<sub>3</sub>

**Imprimerie de Montlignon**  
**61400 La Chapelle Montlignon**  
**Dépôt légal : juin 1994**  
**N° 16877**  
**ISSN 0534-8293**  
**Couverture : Olivier Magna**



---

**INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS  
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES**

**151, boulevard Haussmann 75008 Paris - France**

**Téléphone: (33 - 1) 40.42.54.38**

**Télex: 641320F - Fax: (33 - 1) 40.42.60.71**

**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>*