

L'UTILISATION DES MODELES NUMERIQUES DANS LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES BARRAGES UTILIZATION OF NUMERICAL MODELS FOR DESIGN AND EXPLOITATION OF DAMS

Ho Ta Khanh

Consultant au PECC3

RESUME

Cet article se propose de montrer comment l'utilisation de modèles physiques et numériques, avec leurs avantages et inconvénients respectifs, peut apporter une grande aide aux ingénieurs chargés de la conception et de l'exploitation des barrages.

Les modèles numériques les plus récents permettent notamment de :

- Projeter des barrages plus sûrs en tenant compte des problèmes complexes tels que les couplages hydro-mécanique et thermo-mécanique.
- Prévoir de façon fiable le comportement dynamique des barrages soumis à des séismes de forte intensité.
- Faire des analyses en retour des ouvrages dont le comportement est plus complexe qu'initialement prévu.

Tous ces modèles contribuent ainsi aux progrès de l'ingénierie des barrages, donc à leur sécurité, et à l'optimisation de leur exploitation. Le degré de complexité de ces modèles doit cependant être toujours adapté à l'état d'avancement du projet et aux données disponibles au moment des études.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to show how the utilization of physical and numerical models, with their respective advantages and drawbacks, can greatly help the engineers in charge of the design and operation of dams.

The most recent numerical models allow namely:

- To design safer dams by taking into account complex issues such as the hydraulic/mechanical and thermal/mechanical couplings.
- To predict, with confidence, the dynamic behaviour of dams under strong earthquakes.
- To carry out back analysis of dams for which the behaviour is more complex than initially foreseen.

All these models contribute thus to the progress in dam engineering, then in dam safety, and to the optimization of their operation. However the degree of complexity of these models must be always fitted to the different stages of the project and to the available data at the moment of the study.

2.1 Généralités

Les barrages remplissent un rôle essentiel pour l'alimentation en eau, l'irrigation, la protection contre les crues et la production d'énergie électrique, mais ils peuvent aussi présenter de graves dangers en cas de rupture. C'est pourquoi, leur conception, construction et sécurité en exploitation font l'objet de soin attentif de la part des responsables, qui doivent se tenir constamment informés des progrès

théoriques et pratiques réalisés dans ces domaines. Parmi ces progrès, l'utilisation des modèles numériques, permise par les développements théoriques et les ordinateurs modernes, apparaît comme l'un des plus importants.

Dans cet exposé, on indique d'abord pourquoi des modèles physiques et numériques sont utilisés pour élaborer un projet de barrages avec leurs avantages et inconvénients

respectifs. On détaille ensuite l'emploi des modèles numériques les plus courants, ou les plus récents, à chacune des différentes étapes de la vie d'un barrage, depuis son projet jusqu'à son exploitation en passant par les deux principales étapes intermédiaires que sont sa construction et sa mise en eau. Pour être complet, on signalera à la fin de cet exposé l'utilisation des modèles numériques dans l'exploitation des retenues et dans l'étude de la propagation des ondes de submersion en cas de rupture des barrages, mais sans entrer dans les détails car cela ne fait pas partie de cet exposé.

2.2 Le projet

Un barrage est en général une structure complexe, dépendant de nombreux facteurs non contrôlables et parfois assez mal connus (géologie, séismes, rhéologie des matériaux, crues notamment), qui doit présenter un très haut degré de sécurité en service sans qu'on puisse le tester réellement avant sa mise en eau. C'est dire le défi que posent pour l'ingénieur sa conception et son calcul. Heureusement, le projeteur dispose à présent de modèles physiques et numériques pour lui permettre de prévoir assez bien le comportement de l'ouvrage pendant les différentes étapes de sa vie et cela de façon relativement fiable et économique.

2.2.1 Les modèles physiques

Les modèles physiques, portant sur les problèmes mécaniques (modèles réduits de divers types, photo-élasticité, etc...) ou sur les écoulements (méthode de l'analogie électrique) ont été très employés avant l'apparition des puissants ordinateurs et des programmes de calcul aux éléments finis. Ils tendent à être remplacés de nos jours par des modèles numériques plus souples, plus rapides et surtout plus économiques.

Deux types de modèles physiques continuent cependant à figurer dans les études actuelles :

- Les premiers, de loin les plus fréquents, sont les modèles réduits

hydrauliques des ouvrages et des écoulements de surface (figures 1 et 2).

L'usage des modèles réduits hydrauliques pour la mise au point des évacuateurs de crue, des vidanges, des prises d'eau, des dérivations provisoires, est même presque systématique lorsqu'il s'agit d'ouvrages importants, peu ordinaires ou complexes.

De même, les modèles réduits hydrauliques sont encore utilisés pour l'étude des aménagements des cours d'eau et des zones inondables ou pour certains problèmes particuliers relatifs aux retenues. Signalons cependant que dans ces deux derniers domaines, l'existence de logiciels très performants permet, dès à présent, de substituer aux modèles physiques, des modèles numériques (exemple du logiciel TELEMAC), avec tous les avantages qui en découlent.

- Les deuxièmes sont les modèles réduits servant à l'étude de la résistance des barrages au séisme. Ces modèles ne sont évidemment réalisés que pour de grands ouvrages construits en zone fortement sismique. Ils servent à valider les calculs effectués au préalable à l'aide de différents modèles numériques ou à mesurer des valeurs encore difficiles, voire impossibles, à déterminer par le calcul. En général, les modèles réduits sont placés sur des tables vibrantes pour les ouvrages en béton et dans des centrifugeuses pour les barrages en remblai - la différence est due à des problèmes de respect des lois de similitude pour ces deux différents types de barrage - et ils sont testés jusqu'à la rupture.

2.2.2 Généralités sur les modèles numériques

Au stade du projet, et sauf pour les cas des barrages exceptionnels :

- soit à cause de leur taille,
- soit à cause des conditions très particulières du site (topographie,

géologie très défavorable, grande sismicité),

- soit à cause de la grande technicité du projet, qui présente des caractéristiques hors du commun ou des innovations majeures de conception ou de réalisation (exemple des grands barrages-voûtes construits dans des vallées larges avec des joints de pied),

Il est en général procédé à des calculs simples, dont le contenu et la précision dépendent du type et des dimensions de l'ouvrage, et aussi de l'étape où l'on se situe, dans le déroulement du projet.

Ces calculs concernent principalement la stabilité, les contraintes et les déformations du barrage et de sa fondation. Ils sont faits pour l'ouvrage dans son ensemble, et pour chacune de ses composantes, et pour toutes les étapes importantes de son existence. Les calculs relatifs aux parties d'ouvrage se rapportent, très fréquemment, à leur situation pendant la construction et le premier remplissage de la retenue, et tiennent donc compte du programme des travaux et des différentes hypothèses de cas de charge appliqués pendant ces deux étapes.

- Le dimensionnement des barrages-poids (figure 3) se fait, pour des ouvrages de hauteur faible et moyenne, et au stade de la faisabilité, par une méthode simple, proche de celle adoptée au début du siècle. Elle consiste à analyser, de manière assez conventionnelle, en bidimensionnel, l'équilibre des forces appliquées au-dessus de la section horizontale considérée et à limiter le cisaillement et la traction sur cette section à des valeurs admissibles (figure 4). Pour des barrages-poids de grande hauteur avec des fondations complexes ou construits dans des vallées relativement encaissées, il est fait parfois appel à des calculs aux éléments finis (figure 5).
- Le dimensionnement des barrages-voûtes (figure 6) se fait en calculant, pour chaque forme donnée à la voûte, qui doit respecter certains critères, les contraintes et les déformations et en

l'optimisant progressivement (volume minimal de béton) pour que les résultats obtenus restent dans des limites déterminées. Pendant longtemps, une de ces limites fixait, de façon assez conventionnelle, la valeur maximale de la traction verticale au pied amont de la console de clé, calculée par un modèle élastique linéaire. Pour les grandes voûtes, on a observé que cette limite pouvait, en réalité, être souvent dépassée sans gros inconvénient, parce qu'une certaine fissuration du béton dans cette zone - non prise en compte dans le modèle linéaire - pouvait être acceptée. Ce critère tend donc à être remplacé aujourd'hui par celui de l'ouverture et de l'extension maximales de "la fissure amont" et de sa résistance au cisaillement résiduel (si on veut se cantonner à un calcul élastique, on peut se contenter du ratio traction amont/compression aval). Ces résultats ne peuvent cependant être calculés que par des modèles non linéaires ou faisant appel aux théories plus complexes indiquées ci-dessous, lorsqu'on veut tenir compte de la pénétration de l'eau dans la zone dégradée. Les calculs des barrages-voûtes (statique et dynamique) sont, par conséquent, complexes et ils sont à présent presque toujours effectués par la méthode des éléments finis tridimensionnels (figures 7 et 8).

La prise en compte du phénomène de couplage hydraulique-mécanique dans les barrages en béton est basée sur une observation simple, mais en réalité difficile à modéliser et à calculer : de fortes pressions internes affectent les caractéristiques de résistance à la traction du béton, et inversement la présence d'une fissure provoque une modification de la répartition des pressions internes. Cette nouvelle approche, avec les calculs couplés, s'est révélée très fertile avec les développements des études portant sur la fissuration du béton dans des barrages soumis à des efforts et à des écoulements. Elle a donné naissance à diverses théories : mécanique de la rupture, poro-élastoplasticité (figures 9 et 10), poro-endommagement (figures 11 et 12).

Ces théories sont à présent introduites dans certaines modélisations de barrage au stade de la recherche et pour certaines analyses en retour. Elles sont cependant encore peu utilisées par les bureaux d'études pour le dimensionnement des barrages, à l'exception de quelques voûtes exceptionnelles, où de tels calculs ont été effectués pour étudier plus en détail, et de façon plus précise et plus réaliste, la zone critique au pied amont de la partie centrale de la voûte.

Le calcul de la résistance des barrages aux séismes s'est aussi beaucoup développé ces dernières années. On dispose aujourd'hui de méthodes qui vont de la plus simple : pseudo-statique avec l'effet de la retenue donné par la formule de Westergaard, aux plus sophistiquées : pseudo-dynamique, analyse modale (figures 13 et 14), analyse temporelle (figure 15) par les éléments finis avec intégration des accélérations aux nœuds du modèle à partir d'accélérogrammes synthétiques, modèles linéaires et non linéaires, avec prise en compte ou non des interactions fondation-structure et eau-structure, ...

Pour les barrages en béton, l'analyse des effets thermique et de retrait a une grande importance pour la détermination des risques de fissuration. Comme les problèmes hydro-mécaniques, ceux de thermo-mécaniques présentent un grand intérêt dans l'ingénierie des barrages en béton (figure 16).

Pour les barrages en remblai (figure 17), les calculs de stabilité se font par différentes méthodes. Un facteur qui influence beaucoup la stabilité est la pression interstitielle (figures 18 et 19). Les calculs les plus fiables sont ceux qui sont faits avec les contraintes effectives. Il est souvent intéressant de calculer aussi les déformations, en particulier les tassements, en certains points du barrage, pour évaluer par exemple les risques de fracturation hydraulique (figure 20). Ces derniers calculs se font toujours à présent par la méthode des éléments finis.

Concernant les barrages en remblai et leurs fondations, comme pour les barrages en béton, ce n'est qu'assez récemment que de véritables calculs couplés ont pu être effectués avec le développement de nouvelles théories et de

nouveaux moyens de calcul. Un exemple est donné par le programme UDAM, biphasique, couplant les comportements mécanique des grains et hydraulique du mélange d'air et d'eau contenu dans le matériau. Ce programme permet de calculer l'augmentation des pressions interstitielles dans les barrages en terre pendant leur construction, et évaluer en conséquence la réduction de leur marge de sécurité, pour tout dépassement de la teneur en eau des matériaux mis en place au-dessus de la teneur optimale.

Pour le dimensionnement des barrages en remblais au séisme (figures 21 à 24), des calculs allant du plus simple (pseudo-statique) aux plus complexes sont disponibles (analyse temporelle complète linéaire et non linéaire par les éléments finis, analyse de Newmark), en passant par plusieurs autres méthodes simplifiées (Seed-Makdisi par exemple). Pour ces barrages, l'un des phénomènes les plus dangereux pendant les séismes est la liquéfaction, dont certaines études ont montré l'importance de la valeur de la résistance résiduelle.

2.2.3 L'utilisation des modèles numériques au cours des différentes étapes d'un projet

Dans ce qui précède, on voit que les concepteurs de barrages disposent d'outils de plus en plus puissants leur permettant de mieux approcher l'action de l'eau dans les structures et sa fondation. Cependant, il importe d'ajuster à chaque étape du projet l'effort à produire aux objectifs ; suivant la terminologie utilisée pour désigner ces étapes, de l'inventaire à l'avant-projet détaillé, les méthodes de calcul et les modèles utilisés iront progressivement du plus simple au plus complexe.

Lors de la faisabilité :

L'objectif d'une faisabilité technique est de définir les paramètres principaux des ouvrages de sorte à ce que leurs coûts puissent être évalués avec suffisamment de précision.

A ce stade, ce sont des méthodes de dimensionnement rapides et éprouvées qui seront utilisées, pour lesquelles les coefficients

de sécurité (qu'ils soient partiels ou globaux) sont bien calés sur l'expérience.

- *Pour les barrages-poids* : on utilisera les méthodes traditionnelles, en prenant en compte des hypothèses de sous-pression adaptées aux conditions hydraulique (niveau aval, niveaux en cas de crues), géologique, et d'exploitation.
- *Pour les barrages-voûtes* : dans la plupart des cas, seuls des calculs élastiques linéaires seront faits, par « trial load » ou par éléments finis, le modèle restant simple (un élément dans l'épaisseur et élément de coque). En effet, il s'agit de tester rapidement plusieurs formes.
- *Pour les remblais en terre, en enrochement à noyau* : les calculs de stabilité seront faits sur la base de lignes de glissement circulaires ou polygonales. Pour ces calculs, les hypothèses sur les pressions résultant des réseaux d'écoulement seront fondamentales.
- *Pour les barrages en enrochement à masque amont en béton* : le promoteur de ce type d'ouvrage, Barry Cook, a suivi une approche de la conception basée sur l'expérience. Au stade de la faisabilité, les pentes données à l'ouvrage résulteront d'une simple estimation de l'angle de frottement des divers types d'enrochement mis en place dans les différentes zones du barrage.

Lors de l'Etude Détaillée :

L'objectif sera de définir complètement les ouvrages à réaliser, de sorte qu'ils puissent être évalués sans ambiguïté par les entrepreneurs.

Les études du barrage doivent permettre d'appréhender ce que pourrait être son comportement pour toutes les configurations de charge auxquelles il pourrait être soumis : normales, exceptionnelles, extrêmes. Ce comportement sera examiné non seulement au niveau de l'ensemble de la structure, mais aussi dans les zones particulièrement

sollicitées de l'ouvrage ou de sa fondation. Ce comportement sera aussi étudié dans le cas de la défaillance d'organes fragiles ou instables dans le temps.

- Ainsi, sous l'effet de la poussée de l'eau, les ouvrages en béton, qu'ils soient poids ou voûte verront dans certaines conditions leur pied amont s'ouvrir ou se fissurer. Ceci n'est pas forcément gênant si ces ouvertures ne traversent pas la zone étanche de l'ouvrage et de la fondation.
- Ainsi, un barrage en enrochement à masque peut voir ce masque localement défaillant à la suite de tassements différentiels importants : la conception du barrage devra inclure un zoning permettant de rabattre l'écoulement à l'intérieur du massif, et le pied aval du barrage devra rester stable sous l'effet de l'écoulement.

Les calculs seront là beaucoup plus poussés que pour la faisabilité et effectués sur la base d'un modèle permettant d'approcher la réalité de la structure et de la fondation. Pour des raisons de budget et de délais, ce modèle, en général par éléments finis, sera néanmoins le plus simple possible, la première règle étant qu'il soit adapté à la connaissance que l'on a de la fondation, et à la capacité que l'on a de déterminer les paramètres des lois de comportement des matériaux introduites dans le calcul.

Pour les grands ouvrages, on s'intéressera de près au comportement mécanique et hydraulique des zones les plus sollicitées, en introduisant des lois de comportement non linéaires prenant en compte la sous-pression ou les pressions interstitielles; pour les barrages en béton, les effets de la température jouent aussi un rôle majeur. C'est aussi à ce stade que l'on envisagera les calculs au séisme.

2.3 La construction

Pour les barrages en remblai, on doit procéder à la mesure continue des valeurs des pressions interstitielles sur les cellules installées dans le remblai au fur et à mesure de sa montée (figure 25) Les résultats sont comparés aux valeurs déterminées lors du projet, et les paramètres ajustés aux résultats trouvés. Si des écarts importants sont détectés par rapport au modèle initial, ils sont aussitôt analysés, ce qui peut conduire soit à réviser ce modèle, soit, si le risque est confirmé, à prendre les précautions qui s'imposent sur le chantier (réduction de la teneur en eau, diminution de la cadence de mise en place des terres, modification du traitement des surfaces de reprise en fonction des conditions météorologiques, ...).

Pour les barrages en béton, le suivi pendant la construction porte en général, non pas sur les problèmes mécaniques et hydrauliques, mais sur les problèmes thermomécaniques (figures 26 et 27). Notons toutefois que ces problèmes concernent le risque de fissuration des barrages - ce qui peut être dommageable pour leur bon aspect ou fonctionnement en exploitation - mais qui n'entraînent pas en général leur rupture en cours de construction.

On remarquera que pour tous les barrages, c'est au moment de l'exécution que l'on découvre les conditions réelles de la fondation ; il peut s'en suivre des modifications très importantes, voire radicales du projet. Pour le moins, les modèles utilisés au cours de l'avant-projet détaillé seront ajustés ; pour les barrages en béton, cet ajustement inclura aussi la prise en compte des conditions réelles de température.

2.4 La première mise en eau

C'est une période cruciale de la vie de tous les barrages, et en particulier des barrages en remblais (figure 28), comme l'attestent les statistiques d'accidents de barrages.

Quels que soient le degré de connaissance du site (par les reconnaissances géologiques et géotechniques) et du barrage (par les études portant sur les matériaux qui le composent et

sur son mode de construction), et la validité des calculs effectués, la première mise en eau est le seul test, en vraie grandeur, du prototype que constitue chaque barrage. Cette épreuve est la seule à pouvoir intégrer complètement les données les plus complexes du site et de la construction, et donc à pouvoir réellement prouver la pertinence des choix techniques effectués : il est en effet impossible, avant cette première mise en eau, de tenir compte de toutes les données connues, et a fortiori inconnues, du site, de connaître l'influence exacte des approximations et des simplifications adoptées dans les calculs, et d'évaluer, de manière précise, les conséquences des éventuels défauts de construction, sur le comportement de l'ouvrage.

Si, pendant cette phase critique, le comportement de l'ouvrage s'écarte trop des prédictions du projet, la méthodologie généralement appliquée consistent dans les opérations suivantes, dans l'ordre, et en allant du plus simple au plus compliqué :

- ajuster les données de base souvent mal connues (modules de déformation et de compressibilité par exemple), pour mieux faire correspondre les résultats calculés et mesurés. Si cette opération fournit des valeurs vraisemblables, ces dernières remplacent les anciennes et les calculs peuvent être arrêtés (meilleure évaluation des données de base),

- si cela conduit à des valeurs peu vraisemblables, il faut essayer d'expliquer les raisons de cette discordance. Parmi les différentes raisons possibles, une des plus fréquentes est que le modèle initial est mal adapté au problème posé ou que les hypothèses et approximations introduites dans la modélisation ne sont pas appropriées. Il faut alors modifier en conséquence le modèle (amélioration du modèle),

- enfin si cette dernière opération échoue, il faut parfois substituer, au modèle initial simple, d'autres modèles plus sophistiqués. Ce n'est d'ailleurs souvent à ce stade des études qu'on a recours aux théories et aux modélisations les plus complexes, avec des modèles mécanique/hydrauliques couplés par exemple.

Ces diverses modélisations se font par approximations successives, avec des allers et retours entre les valeurs mesurées et calculées et avec des jeux différents de paramètres, jusqu'au moment où on peut obtenir un ajustement satisfaisant des résultats à l'aide de données d'entrée plausibles (cette estimation étant basée sur la connaissance du site, l'expérience et le jugement du calculateur). Si cette condition est remplie, - on pense en général que la modélisation est alors correcte - il faut pouvoir ensuite interpréter les résultats obtenus pour être capable de porter un jugement sur la sécurité du barrage, ce qui est le but final de cette étude. Il est important de noter qu'un bon modèle est celui qui permet d'expliquer le maximum de faits avec un nombre restreint d'hypothèses.

Ces études, appelées "analyses en retour", doivent être systématiquement effectuées sur tous les grands barrages lors de leur premier remplissage (figure 29). Si des anomalies sont constatées, elles peuvent permettre de mieux comprendre les phénomènes à leur origine, de mieux juger de leur gravité et enfin de prendre les mesures les plus appropriées pour assurer la sécurité du barrage et des populations à l'aval, comme par exemple : arrêt du remplissage de la retenue, abaissement du plan d'eau, alerte des autorités et des populations, travaux confortatifs d'urgence, ...

2.5 La sécurité en exploitation normale

On considère généralement, qu'une fois que le barrage a franchi avec succès le test du premier remplissage jusqu'à sa cote d'exploitation normale, il suffit de surveiller attentivement l'évolution de certains paramètres choisis, pour être à peu près sûr que le comportement de l'ouvrage reste satisfaisant.

Dans cet exposé, on se limitera, dans cette partie relative aux barrages en exploitation, à signaler le rôle important joué par les analyses en retour.

Les analyses en retour, telles que décrites au chapitre précédent, sont couramment utilisées sur des ouvrages en exploitation :

- si des anomalies sont constatées au cours de leur exploitation,
- si leurs conditions d'exploitation ont été profondément modifiées (changement du mode de gestion de la retenue, augmentation du niveau des plus hautes eaux, ...),
- si des travaux pouvant modifier leur structure sont prévus (surélévation, reclavage des joints, ...),
- s'ils ont subi un événement exceptionnel (crue, séisme),

car on est alors obligé de procéder à une analyse approfondie de leur comportement.

Il est à noter que l'analyse des anomalies nécessite souvent de faire appel à des modèles sophistiqués, car on constate fréquemment que les modèles simplifiés ne donnent aucune explication de la pathologie observée ou pire prédisent la ruine de l'ouvrage, alors que le comportement observé est satisfaisant.

Les analyses en retour sont des études souvent longues, laborieuses et coûteuses. Elles sont cependant très riches d'enseignements et contribuent donc fortement - grâce notamment aux développements des théories mécanique/hydrauliques couplées et thermomécaniques, et des modélisations - au progrès de la sécurité des barrages. Les analyses en retour ont aussi servi à valider les théories et les méthodes de calcul sur des ouvrages bien instrumentés, pour lesquels de nombreuses données sont disponibles. Ces ouvrages ont été sélectionnés, soit parce qu'ils possèdent certaines caractéristiques particulières, soit parce qu'ils ont connu des situations exceptionnelles ou - encore plus intéressant pour la recherche - des accidents tout à fait instructifs. Ces études de cas permettent aux chercheurs, et spécialistes de modélisation, de confronter régulièrement leurs résultats, lors des "Ateliers internationaux de calculs", organisés par exemple dans le cadre de la Commission Internationale des Grands Barrages, et elles contribuent donc fortement à faire progresser la technique.

2.6 Les simulations d'exploitation des retenues

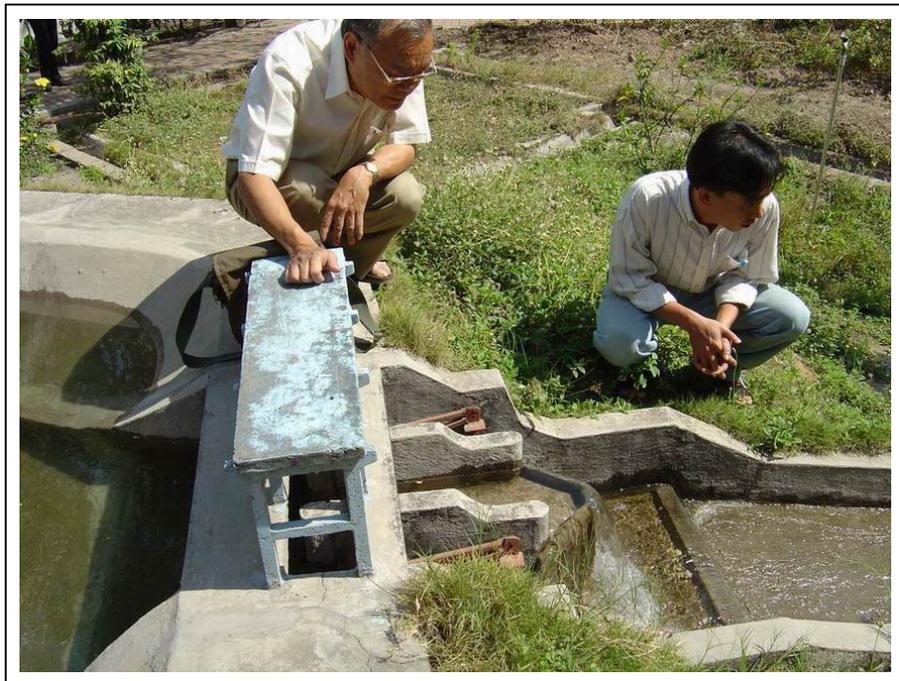
Les modèles numériques sont aussi très utilisés pour simuler l'exploitation des retenues. Ces modèles technico-économiques permettent par exemple d'optimiser l'exploitation des aménagements hydrauliques à but multiple (hydroélectricité, irrigation, soutien des étiages, protection contre les crues, alimentation en eau) et/ou des aménagements faisant partie d'un ensemble d'aménagements appartenant à un ou plusieurs bassins versants. Ces modèles, parfois très complexes, font souvent appel à la programmation linéaire ou dynamique. Ils sont utilisés au moment du projet pour le dimensionnement des retenues,

et donc des barrages, et après leur construction, pour optimiser leur exploitation.

2.7 Les calculs de rupture des barrages et d'ondes de submersion

Les modèles numériques, souvent couplés avec des modèles réduits hydrauliques, sont aussi utilisés pour simuler la rupture des barrages et la propagation à l'aval des ondes de submersion. Ces modèles permettent de mettre au point des plans d'alerte à la population en cas de rupture des barrages, ce qui est à présent obligatoire dans la plupart des pays dans lesquels des réservoirs sont situés à l'amont des zones fortement peuplées.

Figure 1: Modèle réduit hydraulique à B.K.HCM



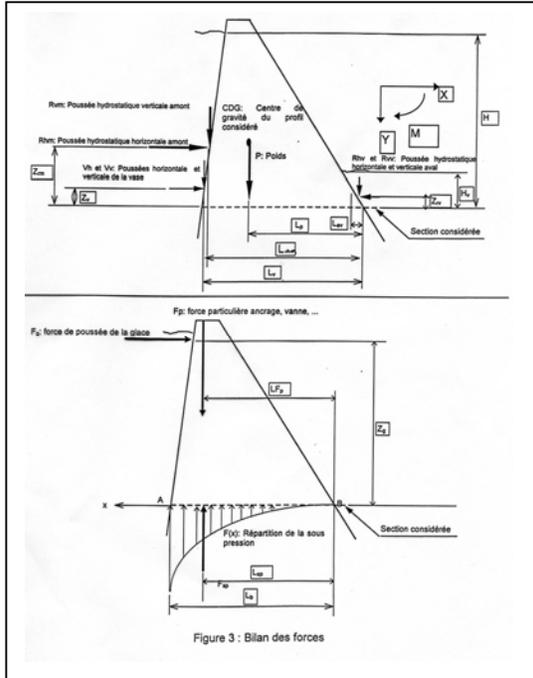


Figure 2 : Calcul simplifié des barrages-poids

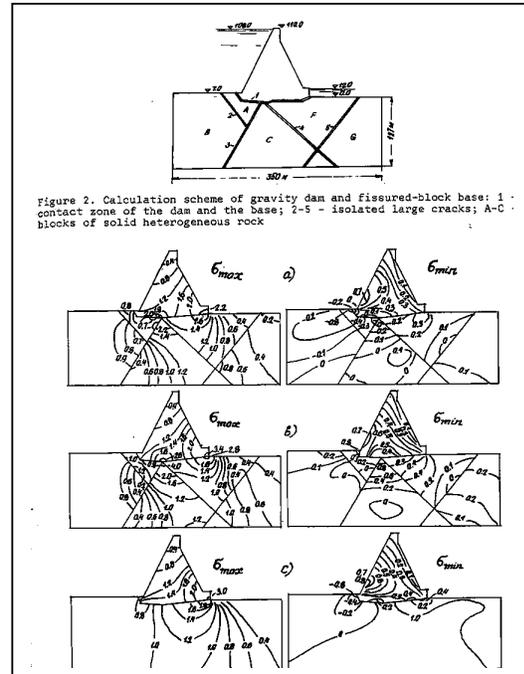


Figure 3 : Calcul d'un barrage-poids et de sa fondation par la méthode des éléments finis

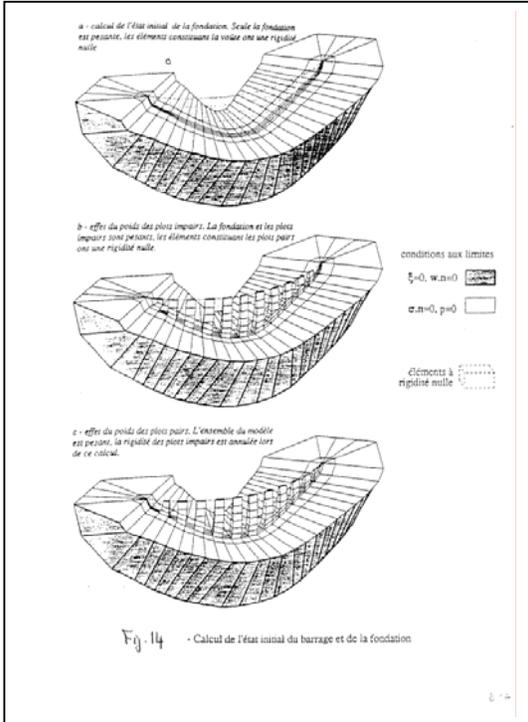


Figure 4 : Calcul des barrages-voûtes par les éléments finis 3D

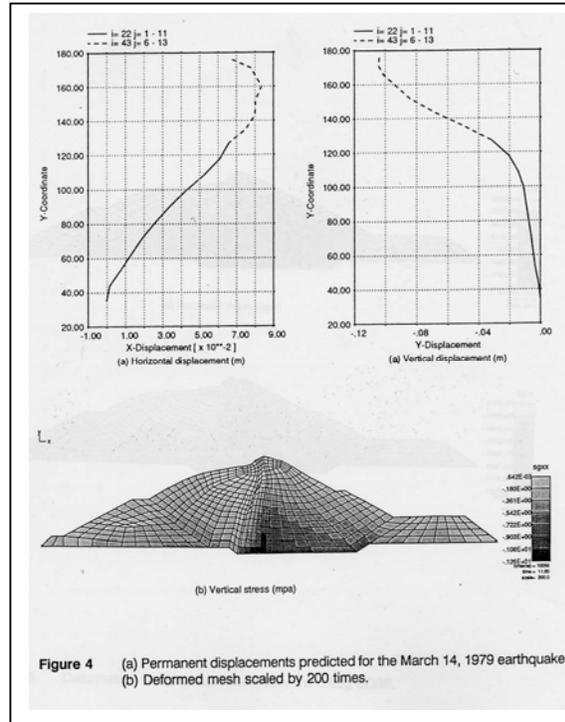


Figure 4 (a) Permanent displacements predicted for the March 14, 1979 earthquake; (b) Deformed mesh scaled by 200 times.

Figure 5 : Barrage en remblai Déformations lors d'un séisme

Figure 6 : Calcul thermique d'un barrage-poids en BCR

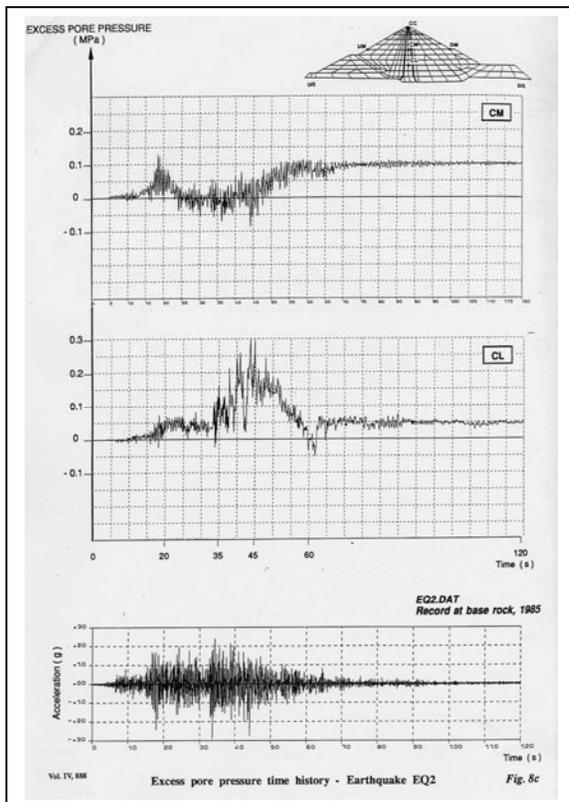
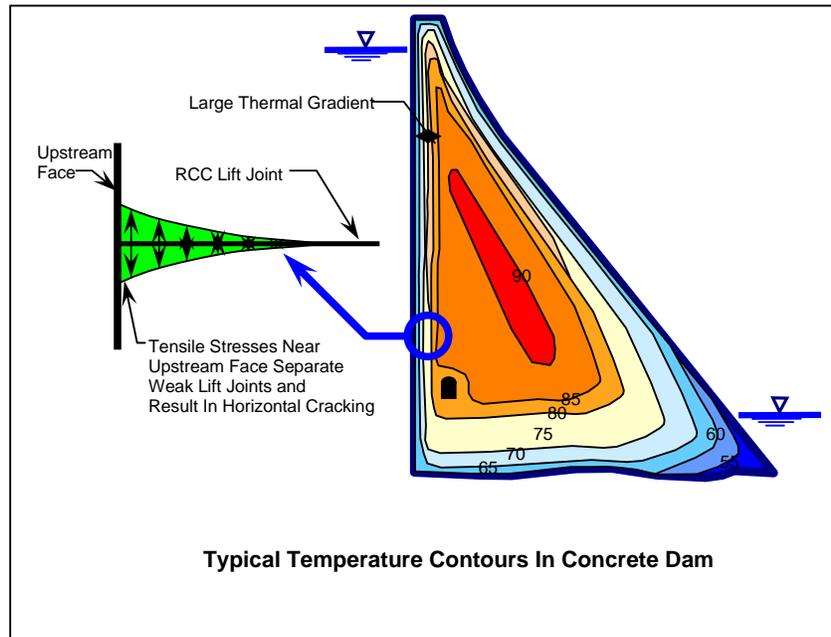


Figure 7:
Barrage en remblai
Variation des pressions interstitielles lors d'un séisme

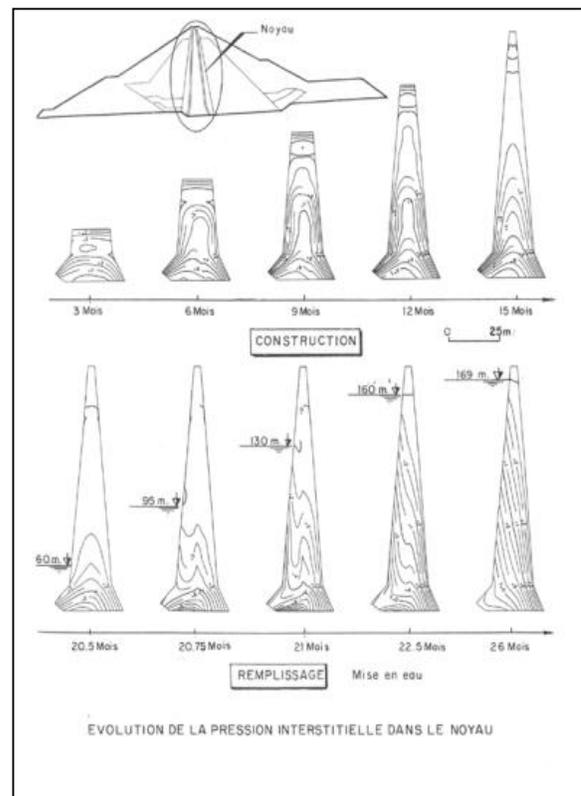


Figure 8 :
Barrage en remblai
Evolution des pressions interstitielles pendant la construction et le premier remplissage

Figure 9 :
Barrage en remblai
Déplacements au cours de la
construction et du premier
remplissage

