

Construction des barrages et sécurité sismique : le point de vue de l'exploitant

Autor(en): **Dallèves, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **78 (1986)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940848>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Construction des barrages et sécurité sismique

Le point de vue de l'exploitant

Pierre Dallèves

Résumé

Depuis une dizaine d'années, la population est plus sensibilisée aux risques technologiques, dont les barrages constituent un exemple typique. D'autre part, la connaissance du phénomène sismique et les méthodes de calcul sismique, ont fait de rapides progrès, sans permettre encore toutefois de décrire de façon fiable la rupture d'un barrage. En Suisse, où la presque totalité des barrages est construite et en fonction depuis de nombreuses années, les propriétaires et exploitants de barrages se tiennent au courant des développements dans ce domaine spécialisé. Un examen sérieux de la question ne permet jusqu'ici pas de mettre en évidence une vulnérabilité particulière des barrages suisses même en cas de séisme de grande intensité, ce qui justifie la confiance éprouvée par les propriétaires et exploitants de barrages en la sécurité très élevée de leurs installations, même dans le cas d'événements exceptionnels.

Zusammenfassung: Talsperren und Erdbeben – der Standpunkt des Betreibers

Seit etwa 10 Jahren ist die öffentliche Meinung auf die technischen Risiken, zu denen auch die Talsperren gehören, sensibilisiert. In der gleichen Zeitspanne sind auf den Gebieten der Seismik und der dynamischen Berechnungsmethoden grosse Fortschritte erzielt worden. Dennoch ist es noch nicht möglich, das Bruchverhalten von Talsperren zuverlässig zu beschreiben. In der Schweiz, wo nahezu alle Talsperren bereits seit vielen Jahren gebaut und in Betrieb sind, halten sich die Talsperrenbesitzer und -betreiber über die Entwicklungen in diesem Spezialgebiet laufend informiert. Eine Überprüfung des dynamischen Verhaltens der Talsperren unter der Annahme von Beben grosser Intensität zeigt, dass diese Bauwerke auf solche Beben nicht besonders empfindlich reagieren würden. Das Vertrauen, das die Talsperrenbesitzer und -betreiber in die grosse Sicherheit ihrer Anlagen legen, bleibt somit auch unter Annahme von extremen Erdbebenbelastungen gerechtfertigt.

Summary: Dam construction and seismic safety – The viewpoint of the dam operator

Over the last 10 years, public awareness of technological risks has been increasing, the case of dam rupture representing a typical one. On the other hand, the understanding of seismic phenomena and the methods of seismic calculations have both significantly progressed, without, however, reaching a level that provides a reliable description of dam failure. In Switzerland, where most of the dams have been built many years ago, their owners and operators have continually kept abreast of new technical developments. In-depth seismic evaluations of dams in Switzerland have not revealed up to now any particular weak point, even under the assumption of a major earthquake. This justifies the high level of confidence placed by dam owners and operators in the safety of their installations, even under exceptional circumstances.

1. Préambule – Raisons de l'intérêt accru suscité par les tremblements de terre

Précisons d'emblée, bien que le titre de l'article ne le mentionne pas explicitement, et tout en reconnaissant que les exploitants de barrages, dans le monde entier, partagent en gros les mêmes préoccupations, que les considérations qui suivent, de caractère très général, sont présentées avec une référence particulière au cas de la Suisse.

Dans un pays comme la Suisse, dont la sismicité est reconnue comme faible à modérée, et dans lequel les barrages sont déjà quasiment tous construits depuis une, voire plusieurs décennies, et se comportent de façon satisfaisante, il peut paraître au premier abord curieux que la sécurité des barrages en cas de séisme puisse à nouveau susciter l'attention du public, au point même de faire l'objet d'interventions politiques au Parlement fédéral.

Quatre raisons principales expliquent cependant ce regain d'intérêt: les deux premières, de caractère très général, sont liées à l'évolution de la société:

– le développement constant des moyens d'information au cours des dernières décennies a pour résultat que chacun est immédiatement informé, en direct, des catastrophes naturelles qui se produisent aux quatre coins du globe, au nombre desquelles figurent les tremblements de terre. Il en résulte une sensibilisation de la population à ce phénomène qui, sans cela, serait probablement resté une abstraction pour la majorité des gens, tout au moins en Suisse, où l'on n'a plus eu depuis longtemps à déplorer de dégâts importants à cause d'un tremblement de terre.

– le besoin accru de sécurité, qui va de pair avec l'augmentation du niveau de vie de la population. Ses besoins élémentaires étant désormais largement pourvus, les risques posés par la vieillesse et la maladie étant en général couverts par les assurances et la sécurité sociale, l'homme du 20^e siècle veut maintenant encore se protéger ou s'assurer contre les catastrophes naturelles et aussi contre les risques résultant d'aménagements techniques, tels que, par exemple, les barrages.

Les deux autres raisons du regain d'intérêt provoqué par les tremblements de terre sont de nature scientifique et technique:

– d'une part, grâce au développement de la géophysique, la compréhension de l'origine et du mécanisme des tremblements de terre a fait des progrès décisifs au cours des deux dernières décennies. Cette meilleure compréhension, jointe à la masse de données récoltées par les réseaux de sismographes installés dans de nombreux pays, a permis d'évaluer l'activité sismique de chaque pays, parfois même de chaque région, et de dresser ainsi des cartes de fréquence et d'intensité sismique,

– enfin, le développement extrêmement rapide des ordinateurs met maintenant à la disposition des ingénieurs des moyens de calcul qui n'existaient pas auparavant et qui, en principe, permettent une analyse plus précise que jusqu'ici du comportement dynamique de grands ouvrages tels que les barrages, les centrales nucléaires, les ponts, les immeubles de grande hauteur et les constructions industrielles. Dans notre pays, la réalisation des grands barrages a eu lieu avant le développement de ces méthodes de calcul dynamique, auxquelles la construction des centrales nucléaires a contribué à donner une impulsion décisive. Un nouvel outil d'analyse étant en train de se créer, il était dès lors naturel de la part de chercheurs et de scientifiques de chercher à le développer encore (car il reste beaucoup à faire), et à l'appliquer aussi souvent que possible.

La question concrète qui se pose en Suisse aux propriétaires d'ouvrages est de savoir si ces nouvelles connaissances et ces moyens plus puissants à disposition justifient, pour le cas du séisme, un réexamen général de la sécurité des barrages conçus et réalisés à l'époque selon les méthodes les plus avancées.

Pour tenter d'éclaircir ce point, quatre questions sont successivement abordées:

- le risque sismique est-il une composante importante du risque global présenté par les barrages, et ce risque global est-il lui-même élevé?
- les méthodes de calcul dynamique actuelles garantissent-elles une évaluation fiable de la sécurité d'un barrage en cas de séisme de forte intensité?
- quels sont, d'après l'expérience et les observations faites lors de séismes réels, les points faibles des barrages et des digues, et comment se présentent, à cet égard, les barrages et les digues construits en Suisse?
- quelle est l'attitude des propriétaires et exploitants de barrages suisses sur ce problème particulier?

2. La sécurité et le risque des barrages

Il n'est pas inutile, avant de situer le risque sismique dans le cadre du risque total présenté par les barrages, de rappeler brièvement ce que l'on entend communément par «risque».

2.1 Risque réel et risque perçu

Si dans l'emploi courant, le mot «risque» est souvent utilisé au lieu de «danger», dans l'acception plus scientifique utilisée par les ingénieurs, les statisticiens et les assurances, ce terme a une valeur plus quantitative et est égal au produit de la probabilité qu'un événement non désiré (une avarie, une défaillance, une rupture) a de se produire, par le volume du dommage causé par cet événement.

Par exemple, la conséquence d'un accident de la circulation n'est en général chaque fois «que» 1 ou 2 morts ou blessés, mais comme la fréquence de ces accidents est très grande, le risque dû à la circulation routière est bien plus grand que celui dû aux ruptures de barrages, dont les conséquences potentielles sont certes très importantes, mais qui sont extrêmement rares, si rares d'ailleurs qu'il est difficile d'attribuer une valeur au risque qui en résulte.

Cependant, tous les sondages ont montré que la population était beaucoup plus sensible au risque de catastrophes, même si elles sont très rares, qu'à des risques beaucoup plus grands, mais qui font en quelque sorte partie de notre vie quotidienne. D'autre part, il est clair que l'individu tolère beaucoup mieux (on parle d'un facteur de 100 à 1000 fois) les risques qu'il a le sentiment d'avoir assumés librement, que les risques qui lui sont imposés par des tiers. Ce sont des facteurs psychologiques, dont il n'est pas possible de faire abstraction; car en définitive, c'est en tenant compte aussi de la sensibilité dominante de chaque époque que le législateur fixe les normes et les règlements.

2.2 Le risque dû aux barrages, tel qu'il ressort des statistiques

De nombreuses études ont été consacrées à l'analyse du risque dû aux ouvrages de retenue ainsi qu'aux statistiques relatives à la rupture de ces ouvrages. Mais le maniement de ces statistiques et leur interprétation correcte, dans le cas de la Suisse, sont délicats.

Une publication de l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie [1] compare les risques pour le public provoqués par les différentes sources d'énergie, dont l'énergie hydro-électrique (figure 1). Dans cette comparaison, les décès et les blessés sont comptabilisés com-

me 6000 resp. 50 MDL (Man-day lost, c'est-à-dire hommes × jours perdus).

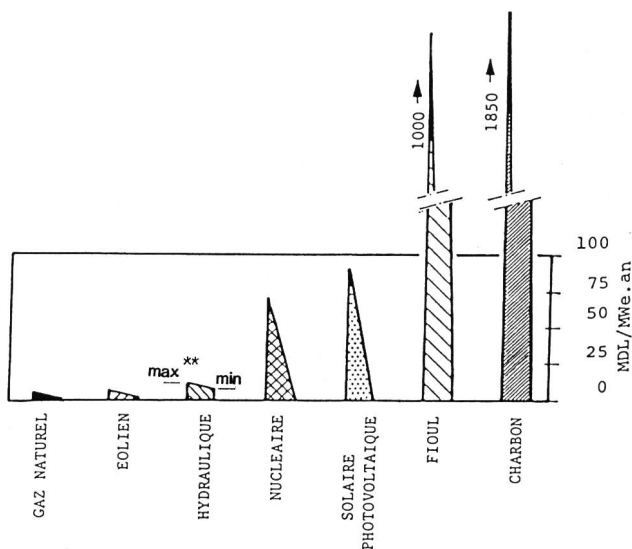
On constate déjà dans cette figure le grand domaine de variation dû aux divergences entre les différentes sources bibliographiques utilisées. Il faut noter que ces chiffres sont basés sur l'ensemble de la statistique mondiale, et que par conséquent, les barrages suisses, qui sont très sûrs, sont agglomérés dans cette statistique avec toutes sortes de digues parfois très anciennes construites dans d'autres continents, selon d'autres techniques, avec des exigences de sécurité qui ne sont pas comparables.

Des essais d'analyse plus fine de ces différents éléments ont été tentés par différents auteurs [2], [3], basés sur le «Registre Mondial» de la Commission internationale des grands barrages. Ce registre regroupe tous les barrages de plus de 15 m de hauteur, soit plus de 30 000 ouvrages. Ont été examinés l'influence, sur le nombre de ruptures, du mode et du matériau de construction, de la date de construction, de l'âge du barrage, du pays d'implantation, et du type de rupture. Vouloir entrer dans les détails de ces statistiques mènerait beaucoup trop loin, mais quelques conclusions, toutes très positives, méritent d'être relevées dans ce contexte:

- les ouvrages construits après 1930 se comportent environ 20 fois mieux que les ouvrages construits avant cette période,
- les ouvrages construits en Europe et au Japon se comportent beaucoup mieux que ceux construits dans les autres continents,
- environ 50% des ruptures se produit au cours des 5 premières années. Ce qui revient à dire qu'un ouvrage qui a passé ce cap a une probabilité de rupture considérablement réduite,
- enfin, les séismes ne sont responsables d'aucune rupture de barrage faisant partie du registre mondial, bien que l'on connaisse quelques cas de barrages et surtout de digues en remblais qui ont été endommagés, sans faire toutefois de victime.

Malgré ce bilan très rassurant, il est clair que, mathématiquement, le risque n'est pas nul, et le sera jamais. Il restera toujours un risque qui peut résulter:

Figure 1. Risques pour le public de la production d'électricité.



(*) MDL/MWe.an = Man-Day-Lost par mégawatt électrique pendant un an soit, jour perdu par suite de maladie, blessure ou décès liés à une production électrique de 1 mégawatt pendant un an en tenant compte du cycle complet (extraction du combustible, construction et exploitation de la centrale, démantèlement, transports divers, etc...).

(**) Valeurs maximales (MAX) et minimales (MIN) des différentes analyses publiées

– d'une part, d'une conception des ouvrages qui n'est pas adéquate, ou de phénomènes dont on aurait négligé de tenir compte. Il s'agit là d'un risque qui peut et doit être éliminé et c'est ce vers quoi tendent tous les efforts des ingénieurs, des propriétaires et exploitants de barrages, et de l'Autorité de surveillance,

– et, d'autre part, de l'apparition d'événements qui n'étaient pas prévisibles ainsi que d'une fraction de risque consciemment acceptée, à cause de son improbabilité [4]. Cette dernière catégorie de risque ne peut pas être éliminée totalement, soit parce qu'il n'est pas identifié (impossibilité technique), soit parce que le coût des mesures qui seraient à prendre pour s'en prémunir est supérieur à l'avantage qui peut résulter de ces mesures (aberration économique). Le risque résiduel extrêmement faible est donc assumé par les propriétaires des ouvrages, qui ont la possibilité de s'assurer en conséquence.

2.3 La pratique de la sécurité des barrages

La législation suisse en matière de forces est déjà ancienne, puisque la loi fédérale sur la police des eaux du 22 juin 1877 déjà posait les premiers principes de la responsabilité des propriétaires d'ouvrages et de la surveillance des ouvrages par la Confédération. Cette législation a été depuis modernisée, et complétée à plusieurs reprises.

Il est intéressant de remarquer à ce sujet que, sur bien des points, la réglementation suisse en la matière n'est pas aussi rigide et détaillée que celle de certains autres pays, comme par exemple l'Allemagne fédérale. Elle laisse encore au Maître de l'ouvrage une certaine latitude, ce qui l'oblige à réfléchir et à prendre ses responsabilités en matière de sécurité.

Il n'est pas exagéré d'affirmer que la sécurité est, pour le propriétaire d'un barrage, une préoccupation qui va bien au-delà de ce qui serait strictement exigé par la loi, et qui commence avec la conception de l'ouvrage, et se poursuit durant toute la vie de l'ouvrage, comme le rappelle le tableau 1.

Cette remarque est également valable pour la sécurité en cas de séisme.

3. Conception parasismique et calculs dynamiques des barrages

Il s'agit là des mesures que l'on prend au stade du projet. L'objectif recherché est de mieux connaître le comportement de l'ouvrage en cas de séisme. Cette meilleure connaissance doit permettre ensuite de porter un jugement plus fiable sur la sécurité et, le cas échéant, s'agissant d'un projet, de le modifier ou de l'optimiser en tenant compte de ce comportement.

D'emblée, une remarque s'impose. En Suisse, les barrages sont pratiquement déjà tous construits. Les résultats de calculs sismiques plus élaborés que ceux faits par les ingénieurs de l'époque du projet ne peuvent donc être utiles qu'au contrôle «a posteriori» du comportement d'ouvrages existants, et non à l'amélioration de leur conception.

À l'époque, c'est-à-dire au moins jusque vers 1970, on tenait compte de l'effet des tremblements de terre sur les barrages suisses simplement par l'application d'une force massique horizontale, dite «pseudo-statique», égale à 10% de la pesanteur. Pour le béton, une résistance à la traction nulle ou faible était admise. Une sous-pression légèrement accrue était prise en compte, sous la fondation, pour tenir compte de l'ouverture éventuelle de joints. La pression dynamique du lac d'accumulation sur le barrage était prise en compte par une formule théorique très simplifiée dite de Westergaard ou de Zangar. Et c'est avec ces efforts supplémen-

Tableau 1. Assurance de la sécurité des barrages.

1. Au stade du projet	
Choix de l'ingénieur	
Choix de l'emplacement	
(études géologiques, sondages, essais matériaux)	
Calculs avec sécurité suffisante	
Dimensionnement vidange de fond	
Choix de la crue pour le dimensionnement de l'évacuateur	
Au stade de la construction	
Surveillance des travaux	
Contrôle de la qualité (matériaux, mise en place, injections)	
Contrôles, mesures lors de la première mise en eau	
3. Au stade de l'exploitation	
Surveillance permanente (hebdomadaire ou mensuelle) – Exemple d'efficacité: Zeuzier; installation télémesures et télétransmissions	
Contrôles annuels du propriétaire/exploitant	
Contrôles quinquennaux avec experts et Confédération	
Entretien	
Modification, rééquipement [5], [6]:	p. ex. remplissage barrages évidés (Cleuson)
	augmentation capacité évacuateur de crues
Systèmes d'alarme	

taires qu'un calcul classique, c'est-à-dire statique, de contraintes était effectué, ainsi qu'un calcul au glissement et au renversement pour les barrages-poids, et de stabilité pour les digues en terre et en enrochements. Typiquement, la charge du séisme provoquait alors une augmentation des contraintes de l'ordre de 10–15% pour les barrages-voûtes, et un peu plus pour les barrages-poids. Mais, compte tenu de la rareté du phénomène, on admettait une certaine traction dans le béton, on tolérait une certaine fissuration du béton et une diminution du coefficient de stabilité pour les digues, qui devait toutefois rester supérieur à 1.

On savait certes, déjà à cette époque, qu'un tel modèle de calcul n'avait qu'un rapport assez éloigné avec le comportement effectif de l'ouvrage en cas de séisme. Cependant, c'était ce que l'on pouvait faire de mieux. Et l'on était conscient des marges de sécurité très importantes (même si on ne pouvait pas toujours les chiffrer) contenues en particulier dans le choix des valeurs de résistance des matériaux et dans les coefficients de sécurité.

D'autre part, on savait également déjà à cette époque que la valeur d'accélération de 0,1g choisie pour le calcul des forces «pseudo-statiques» était inférieure à la valeur de pic de l'accélération durant un séisme vraiment très violent. Mais cette réduction était justifiée (et ceci est toujours valable) par le fait que, durant un séisme très violent, une partie importante de l'énergie est absorbée par la déformation plastique des matériaux et des éléments de construction. En admettant de telles déformations plastiques, on admet implicitement aussi, localement, quelques dégâts, qui sont tolérés pour de tels événements exceptionnels, pour autant qu'ils ne mettent pas en cause la sécurité de l'ouvrage.

Il n'est pas exagéré de dire que le développement fulgurant des ordinateurs à partir de 1965 environ a révolutionné les possibilités de calcul. Des méthodes de calcul dynamique ont été développées, tant pour les ouvrages en béton que pour les digues en terre, méthodes sur lesquelles il serait trop long de s'étendre ici.

Or, un principe qui s'applique dans le cas des calculs parasismiques avec une pertinence particulière dit que la qualité et la fiabilité des résultats d'un calcul ne peuvent être meilleures que celles des données et des hypothèses à la base du calcul. Et c'est là que se situent encore, dans le cas des calculs dynamiques, les inconnues et les imprécisions, dont les principales sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Calcul sismique – Imprécision et arbitraire dans les données et les hypothèses à la base de calcul.

1. Définition du séisme de calcul

Intensité du séisme: définie sur la base de considérations statistiques – valeurs choisies supérieures aux valeurs historiquement enregistrées. Accélérogramme (contenu des fréquences, durée du séisme) arbitraire. Idem pour le spectre de réponse, car il n'y a pas deux séismes qui se ressemblent. Choisir une enveloppe est en revanche pénalisant. Direction de propagation de l'onde sismique. Elle est inconnue, mais admise perpendiculaire à l'axe du barrage (hypothèse pessimiste). Influence de la topographie. L'excitation sismique sur toute la bordure du modèle n'est ni en phase, ni de même amplitude, ce dont on ne tient pas compte.

2. Comportement dynamique des matériaux

La résistance à la traction et à la traction composée du béton et de la roche sous l'effet de charges dynamiques et sous l'effet de charges cycliques est mal connue. Les résistances au cisaillement du sol soumis à des charges cycliques sont mal connues. Essais en laboratoire pas toujours représentatifs. Le coefficient d'amortissement et sa variation en fonction de la déformation sont mal connus.

3. Modélisation

Les résultats du calcul dépendent des limites du modèle. Le comportement dynamique dépend aussi de la fissuration préexistante du béton (thermique, de retrait) et de la fondation, qui est mal connue. La modélisation du béton fissuré n'est pas encore complètement résolue. L'interaction barrage-retendue est encore controversée.

Les résultats obtenus par ces calculs sont intéressants du point de vue qualitatif, mais, sur le plan quantitatif, l'influence accumulée de toutes ces inconnues et imprécisions peut avoir pour conséquence, pour des séismes de même accélération de pointe, des différences dans la réponse d'un ordre de grandeur de 3 à 4 fois [7].

En fait, tout ce domaine est encore en pleine évolution, des progrès rapides sont enregistrés, mais, au stade actuel, «chaque projet semble constituer une recherche, et les approches sont très divergentes, notamment pour les barrages en remblais» [8].

Quant aux essais de modèles sur table vibrante ou encore les essais d'excitation dynamique in situ au moyen de masses rotatives excentriques [9, 10], ils peuvent donner une bonne image du comportement du barrage dans le domaine élastique. Ils ne peuvent cependant pas reproduire correctement le mécanisme de rupture dans le béton, et encore moins dans la roche ou le remblais.

Des constatations qui précèdent, il est légitime de tirer la conclusion que, dans l'état actuel des choses, le calcul dynamique doit être recommandé dans le cas du projet de nouveaux grands barrages, ne serait-ce que par l'optimisation qualitative du projet qu'il permet. En revanche, en

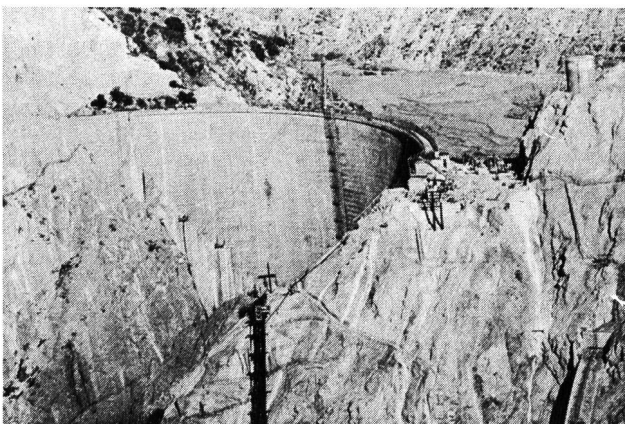


Figure 2. Barrage-voûte de Pacoima (Californie).

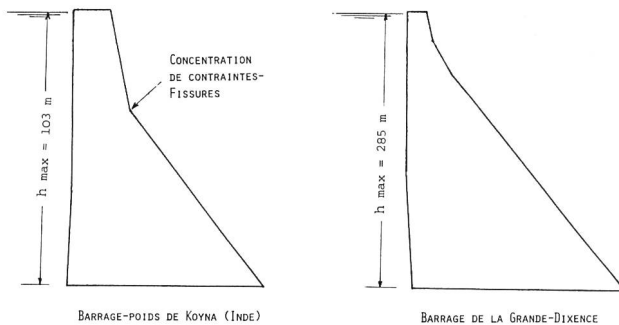


Figure 3. Coupe en travers typique de deux barrages-poids.

raison de l'incertitude des résultats qu'il fournit sur le plan quantitatif, on ne peut pas encore se baser sur lui pour juger valablement de la sécurité d'un barrage existant en cas de séisme de forte intensité. Du fait que les barrages sont déjà construits et que leur sécurité intrinsèque ne sera pas modifiée par des calculs dynamiques «tous azimuts» faits a posteriori, mieux vaut en tout cas attendre que les nombreuses recherches en cours aient permis d'éclaircir le plus possible de points encore mal connus. Beaucoup d'efforts restent à faire jusqu'à ce que soient mises au point des méthodes permettant de décrire de façon qualitative et quantitativement correcte le comportement des grands barrages en cas de séismes.

4. Observation du comportement réel des barrages durant les séismes

Si les calculs dynamiques ne nous apportent pas encore, avec suffisamment de fiabilité, de réponse à la question de la sécurité des barrages existants en cas de séisme, une autre méthode, riche d'enseignements, consiste en l'observation du comportement réel et des dégâts éventuels subis par les ouvrages qui ont été exposés à un tremblement de terre dont les caractéristiques sont connues grâce à la présence, à proximité ou directement sur l'ouvrage, d'accélérographes à fortes secousses. Ces observations et l'interprétation qui a pu en être faite ont permis de mieux connaître les mécanismes de défaillance, et d'identifier les points faibles ou sensibles des ouvrages en cas de séisme. Sur cette base, il est alors possible à l'exploitant, dans de nombreux cas, d'évaluer la tenue de ses ouvrages au séisme en focalisant son attention plus spécialement sur ces points sensibles.

4.1 Barrages en béton

On n'a pas d'exemple de barrage en béton qui se serait rompu sous l'effet d'un tremblement de terre. Les quelque 22 barrages qui se trouvaient dans un rayon de 50 km autour de l'épicentre n'ont pas été endommagés lors du séisme du Frioul en 1976. On ne connaît au total que 5 cas de barrages en béton (sur un total de plusieurs milliers) endommagés par des séismes très violents, par exemple le barrage de Pacoima, un barrage-voûte de 113 m de hauteur situé en Californie, et qui a subi une secousse estimée à au moins 0,6 g à la base [figure 2], soit bien davantage que ce que l'on peut attendre dans la région la plus sismique de Suisse une fois tous les 10000 ans. Ce barrage, qui n'avait pas été calculé pour le cas de charge du séisme, s'en est tiré avec simplement l'ouverture d'un joint de contraction vertical, des fissures dans le bloc de butée aval, un ébranlement de l'appui rive gauche. Les réparations ont été faites depuis et le barrage est de nouveau en service [11].

Un autre exemple célèbre est celui du barrage de Koyna, en Inde, un barrage-poids de 103 m de hauteur et de 853 m de longueur, dont une coupe en travers caractéristique est

Tableau 3. Comportement dynamique des barrages en béton.

1. Modes de défaillance [12]

Glissement du barrage sur sa fondation.
 Défaillance d'un appui rocheux.
 Ouverture de joints ou de fissures telles qu'une perte d'eau incontrôlable se produise ou que la pression d'eau dans une faille rocheuse puisse la rendre active.
 Déplacement par cisaillement ou basculement de plots ou sections de la partie supérieure.
 Endommagement grave de l'évacuateur de crue ou de la vidange de fond.

2. Mesures à prendre, conditions à remplir

Eviter les failles actives ou potentiellement actives sous ou à proximité immédiate des fondations du barrage.
 Pendage et orientation favorable de l'assise rocheuse sous la fondation et sur les flancs.
 Qualité et contrôle du voile d'injection, contrôle des sous-pressions, en particulier côté aval, drainage des fondations.
 Les joints entre plots doivent être soigneusement imbriqués et injectés.
 En cas de comportement de l'ouvrage, en service normal, différent de celui admis pour les calculs, expliquer les causes de la divergence.
 Le couronnement ne doit pas être surdimensionné. En cas de discontinuité d'angle entre le couronnement et le parement aval du barrage-poids, cette partie doit être spécialement renforcée.
 Eviter les structures associées à la voûte, avec de grands porte-à-faux, avec des valeurs de résonnances très différentes.

Tableau 4. Comportement dynamique des digues en remblais.

1. Modes de défaillance

Rupture du barrage par liquéfaction des matériaux de l'ouvrage ou de la fondation.
 Rupture due au glissement superficiel ou profond.
 Perte de revanche, à la suite de glissement ou de tassement provoqué par le séisme.
 Ruptures à la suite d'écoulements et d'érosions le long de conduites sous remblais ou le long des contacts entre les remblais et les appuis.
 Dommages, aux conséquences dangereuses, à la vidange de fond et à l'évacuateur de crues.
 Déversement sur le barrage de la vague provoquée par un glissement ou un éroulement rocheux de grand volume dans la retenue.

2. Mesures à prendre, conditions à remplir

Bon contact entre la fondation et le remblai.
 Utilisation de matériaux non sensibles à la liquéfaction, par exemple argileux.
 Bonne compaction des matériaux.
 Conformité des caractéristiques effectives des matériaux durant la construction avec les valeurs utilisées pour le calcul de la stabilité.
 Contrôle des pressions interstitielles et conformité avec les valeurs admises dans le calcul.
 Nombre suffisant et comportement correct des filtres, de façon à empêcher l'apparition d'érosion interne («piping»), et des drains.
 Qualité et plasticité du revêtement d'étanchéité amont (le cas échéant).
 Revanche suffisante.
 Dimensionnement généreux de la vidange de fond et de l'évacuateur de crues.
 Evacuateur de crue de conception simple, sans organes électro-mécaniques, si possible séparé du barrage.
 Auscultation de l'ouvrage en service (déformation de crête, cellules de pression interstitielle, mesures de fuites).

donnée dans la figure 3. Les accélérations de pic enregistrées sur le barrage, à 10m au-dessus de la fondation, lors du séisme de 1967, ont été de 0,63g selon l'axe du barrage, 0,5g perpendiculairement à cet axe, et 0,35g pour la composante verticale. Or, ce barrage n'avait été calculé que pour une accélération horizontale de 0,05g. Il comportait en outre un couronnement surdimensionné avec une discontinuité brusque de l'inclinaison du parement aval (voir, à titre de comparaison, le profil en travers du barrage de la Grande Dixence. Les principaux dégâts ont été quelques fissures à l'amont et à l'aval, au niveau du changement de section, avec apparition d'une venue d'eau. Par la suite, ce barrage a été localement renforcé et remis en service. Le tableau 3 résume les principaux aspects auxquels il con-

vient de prêter attention si l'on veut s'assurer un bon comportement parasismique des barrages en béton.

4.2 Digues en remblais

A ce jour, seules une douzaine de digues en remblais, toutes inférieures à 15 m de hauteur, se sont rompues dans le monde par suite de séismes, sur un total de l'ordre de 20000. Quelques digues plus importantes ont également subi des désordres graves, sans aller toutefois jusqu'à la rupture (par exemple la digue de Lower San Fernando en 1971). Il n'y a pas eu de victimes, même si ce fait peut, dans quelques cas, être attribué à des circonstances favorables. Les causes de ces ruptures et de ces dégâts ont été étudiées par de nombreux spécialistes [13], [14], et mènent à la conclusion que dans la totalité des cas, il s'agissait soit de matériaux inadéquats (sables fins, risques de liquéfaction des corps d'appui), soit d'une mise en place inadéquate (remblais hydrauliques, avec un taux de compaction insuffisant, érosion interne), soit de drainages insuffisants. Ces erreurs n'étaient d'ailleurs en général pas dues à l'incompétence des ingénieurs, mais au niveau de connaissance en matière de mécanique des sols qui était tout simplement encore peu développé à l'époque de la construction de ces digues.

Les digues en remblais plus modernes et construites, comme c'est le cas des digues suisses de Göscheneralp, de Mattmark, selon les règles de l'art modernes ont montré qu'elles étaient parfaitement capables de résister, sans dommage appréciable, à un séisme de l'ordre de 0,2 g à la base et 0,3 à 0,5 g à la crête (par exemple, digue de 131 m de hauteur de Miboro, Japon, et digue de 148 m de hauteur de El Infiernillo, Mexique).

Le tableau 4 résume les principaux aspects qui influencent le comportement sismique et jouent un rôle pour la sécurité des digues en remblais en cas de séisme.

4.3 Appréciation de la sécurité des barrages suisses en cas de fort séisme

A l'issue de cet examen sommaire des principaux effets des tremblements de terre sur les barrages en béton et les ouvrages en remblais, il faut se poser la question de savoir si les barrages suisses seraient sûrs au cas où se produirait le plus grand tremblement de terre possible chez nous, le séisme qui se produit une fois tous les 1000 à 10000 ans, caractérisé par une accélération de pic de 0,2g à 0,3g.

– Un premier élément de réponse globale nous est donné par la constatation déjà faite que jamais un barrage construit selon les règles de l'art, ce qui est le cas des barrages suisses, ne s'est rompu à la suite d'un séisme. En fait, même si le calcul sismique effectué à l'époque est quelque peu dépassé, on sait qu'en contre-partie, de nombreux éléments qui ne sont pas pris en compte dans le calcul donnent aux barrages une réserve de résistance supplémentaire importante, même si elle est difficilement chiffrable. C'est le cas par exemple du comportement plastique des matériaux et des sols, et de la dissipation d'énergie qui en résulte, ainsi que d'autres effets (effet de voûte dans les barrages-poids, etc). On est donc en droit de supposer, sur la base des statistiques, que le risque global dû aux barrages n'est pratiquement pas modifié par les tremblements de terre.

– Une réponse techniquement plus motivée est ensuite donnée par l'examen des tableaux 3 et 4 présentés ci-dessus. En faisant l'inventaire des mesures à prendre et des conditions à remplir pour une conception parasismique des barrages, on s'aperçoit qu'en fait, ces mesures et ces conditions sont pratiquement toutes remplies pour nos barrages suisses. En effet, la plupart de ces mesures devaient de

toute manière être prises pour d'autres raisons, indépendantes du risque sismique: pour assurer un comportement statique adéquat, le drainage des fondations, la protection contre les crues. Cela signifie, en d'autres termes, que, du fait de tous les autres cas de charge déjà pris en compte, le cas de charge «séisme» n'entraîne pratiquement pas d'exigences supplémentaires dans le projet d'un barrage auquel ont été appliqués, dans tous les autres domaines, des critères de qualité et de sécurité très élevés.

En fait, de par leur géométrie, les barrages ne sont pas des ouvrages intrinsèquement très sensibles aux séismes, et on peut affirmer qu'un projet bien étudié en statique, qui cherche à minimiser les déformations, à éviter les concentrations de contraintes et les risques de fracturation hydraulique constitue en général également un bon projet parasismique.

Ces sont ces considérations qui permettent aux propriétaires et exploitants des barrages suisses de faire preuve d'une très grande confiance en la sécurité de leurs ouvrages, même en cas de séisme exceptionnel.

5. Efforts faits par les propriétaires de barrages en vue d'une meilleure connaissance du comportement et de la sécurité des barrages aux séismes

L'ensemble des considérations qui précèdent a suffisamment montré que la confiance que les exploitants placent dans la sécurité de leurs barrages n'est pas automatique, et qu'elle ne les dispense pas de remettre leurs opinions en question chaque fois que le développement des connaissances le justifie. Ceci est valable en particulier dans le domaine des calculs dynamiques, qui intéressent les propriétaires de barrages dans la mesure où l'on peut espérer qu'ils permettront de mieux définir la marge de sécurité dont leurs ouvrages disposent.

C'est ainsi qu'en 1975 a été constitué, dans le cadre de la Commission internationale des grands barrages (CIGB), un «Comité des aspects sismiques des projets de barrages». Ce comité a publié en 1983 un bulletin technique intitulé «Séismicité et conception des barrages» [15]. Ce même comité vient de faire paraître également des recommandations relatives à l'inspection des barrages après les séismes [16]. Le comportement des barrages aux séismes a formé l'un des grands thèmes du treizième congrès du CIGB à New Delhi en 1979. Les tremblements de terre de San Fernando en 1971 et du Frioul en 1976 ont fait l'objet d'investigations et d'analyses très détaillées [17], [18], [19]. Une mission d'étude a été dépêchée dans la région du Frioul, pour les sociétés d'électricité suisses, afin d'observer et d'étudier les conséquences de ce séisme sur les constructions [19].

Sur le plan suisse, une étude globale de la séismicité en Suisse a été financée de 1975 à 1977 par les compagnies d'électricité [20], ainsi que, de 1982 à 1984, une étude devant conduire à la définition de spectres de réponses valables pour la Suisse [21].

La Confédération, d'autre part, soutient depuis plusieurs années des travaux de recherche dans les instituts spécialisés des écoles polytechniques, tels que la définition du séisme de dimensionnement dans les régions alpines [22], la sollicitation des ouvrages en présence de comportement non linéaire des matériaux, la simulation mathématique des zones fissurées dans les ouvrages en béton sous sollicitation sismique, [23], [24], le comportement du béton sous charge cyclique, etc... Entre 1977 et 1979, à la demande de la Confédération, un réseau de surveillance sismique a été installé, sur une dizaine de barrages alpins, aux frais des propriétaires. L'installation d'un réseau d'accélérographes

pour fortes secousses en différents points de la Suisse et sur quelques barrages fait également l'objet de discussions, même s'il ne faut en attendre de résultats qu'à long terme, compte tenu de la faible séismicité de la Suisse. Notons qu'actuellement déjà le barrage d'Emosson comporte trois instruments de ce type, qui ne se sont déclanchés qu'une seule fois depuis leur installation.

Le Comité national suisse des grands barrages, qui représente les propriétaires suisses de barrages, s'occupe également de ces problèmes, et a institué en 1979 une commission sismique dont la mission est d'étudier les implications des tremblements de terre sur les barrages et, le cas échéant, d'émettre des recommandations à ce sujet.

Enfin, le fait que le présent symposium de Brigue soit également soutenu par les producteurs d'électricité témoigne à l'évidence de leur intérêt.

En résumé, s'il fallait définir en quelques mots l'attitude des exploitants de barrages face aux nouvelles méthodes sophistiquées de calcul dynamique qui sont actuellement en cours d'évolution rapide, on pourrait dire que cette attitude est celle de tout praticien face au chercheur: un grand intérêt à l'égard des développements en cours, qu'il lui arrive même de soutenir financièrement, pour autant qu'il ne s'agisse pas d'art pour l'art, mais, par la force des choses, le praticien se situe un peu en retrait par rapport aux théories et aux méthodes qui s'échafaudent dans les laboratoires, les instituts de recherche ou les centres de calcul. Il attend que ces méthodes se décantent et, puisqu'il est responsable non seulement de la sécurité, mais aussi de l'économie de son exploitation, il ne les applique que si l'investissement consenti lui semble justifié par une amélioration réelle de l'état existant.

6. Conclusion. La sécurité des barrages en cas de séisme: un problème de société

L'évaluation du risque présenté par les barrages en cas de séisme est une question technique, dont les propriétaires de barrages s'occupent.

Sur ce plan technique, la confiance qu'ils placent dans le comportement de leurs ouvrages en cas de séisme apparaît justifiée, et, on peut l'affirmer sans être accusé d'autosatisfaction, cette confiance est partagée par les autorités fédérales de surveillance. D'ailleurs, les travaux, les recherches et les observations faites ou en cours aux niveaux national et international font progresser peu à peu l'état des connaissances et permettront ainsi de réduire les marges d'incertitude qui subsistent dans ce domaine.

En revanche, le niveau de risque que la société est prête à accepter n'est pas une question technique, mais une question sociale et psychologique. Indéniablement, la sensibilité de la population augmente à l'égard de ce qu'il est convenu d'appeler les risques technologiques. Cette attitude, compréhensible en soi, conduit, si l'on n'y fait pas attention, à pousser les exigences de sécurité dans certains domaines au-delà de ce qui est justifié techniquement et supportable économiquement. Elle devient alors un facteur de paralysie qui compromet sérieusement le rythme de développement de la société [25].

Et c'est là qu'intervient l'aspect économique de la sécurité. A titre d'exemple, une étude [26] a montré qu'imposer l'application en Suisse de normes parasismiques plus sévères pour les nouvelles habitations reviendrait à 2,7 millions de frs./an et permettrait de sauver en moyenne 0,15 mort/an, ce qui permet de chiffrer à 19 millions de frs. le coût de la vie humaine sauvée par ce moyen. Or on sait que, dans d'autres domaines (par exemple, en généralisant le dépistage

préventif de maladies), des vies humaines peuvent être sauvées avec un centième du montant cité plus haut. En clair, cela signifie qu'il est absurde, du point de vue de l'économie nationale, de vouloir encore améliorer à grands frais la sécurité d'installations déjà très sûres (et les barrages se rangent dans cette catégorie), aussi longtemps que subsistent parallèlement de vastes domaines où cette sécurité n'est de très loin pas atteinte et pourrait être améliorée à un coût bien moindre.

La même remarque s'applique en matière d'assurance. Les propriétaires de barrages en réexamen de temps en temps le montant, en tenant compte des nouvelles données et de l'expérience, mais dans ce domaine aussi, des exigences excessives, difficilement justifiables techniquement, sont facteur de renchérissement, en définitive au détriment des consommateurs d'électricité.

Sur cet aspect du risque sismique, comme sur d'autres aspects, il appartient aux propriétaires et aux exploitants de barrages, face à une opinion publique dont la sensibilité est fluctuante, d'évaluer et de présenter en professionnels ce risque sous l'angle technique et économique, et de le replacer dans son contexte. C'est ce qui a été tenté dans le présent article.

Références bibliographiques

- [1] UNIPEDE: Acceptation et risques comparés des différentes sources d'énergie. Congrès d'Athènes 1985.
- [2] *N. Schnitter*: Sûreté statistique des barrages. «wasser, energie, luft – eau, energie, air» No 5, 1976.
- [3] *A. Goubet*: Risques associés aux barrages «La Houille blanche» No 8, 1979.
- [4] *A. von Gunten*: Ist Tragwerksicherheit machbar? – Rektoratsrede, ETH-Tag 1985.
- [5] *R. Lafitte*: Mesures pour renforcer la sécurité des barrages. Rapport général, question 59, Quinzième congrès des grands barrages, Lausanne 1985.
- [6] Entretien et rénovation des barrages de plus de 50 ans en Suisse. Groupe du Comité national suisse des grands barrages, Quinzième congrès des grands barrages, Lausanne 1985.
- [7] *M. Wieland*: State-of-the-Art Report über das dynamische Verhalten von Staumauern und von Staumauerbeton während Erdbeben. Mitteilung Nr. 24 der VAW, Zürich 1977.
- [8] *R. G. T. Lane*: Rapport général – Résistance des barrages aux tremblements de terre. Treizième congrès des grands barrages, New Delhi, 1979.
- [9] *F. Calciattiet al.*: Experience gained during in situ artificial and natural dynamic excitation of large concrete dams in Italy. Treizième congrès des grands barrages, New Delhi, 1979.

- [10] *P. J. Deinum et al.*: Vibration tests on Emossion arch dam, Switzerland. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 10, 1982.
- [11] *R. P. Sharma et B. T. Sasaki*: Rehabilitation of earthquake-shaken Pacoima arch dam. Quinzième congrès des grands barrages, Lausanne, 1985.
- [12] G. Post et al.: Conception parasismique des barrages. Génie parasismique, ouvrage publié sous la direction de *V. Davidovici*, Presses de l'ENPC, Paris, 1985.
- [13] *H. B. Seed et al.*: The performance of earth dams during earthquakes. «Water Power and Dam Construction» August 1980.
- [14] *G. Post et P. Florentin*: Conception parasismique des barrages en remblais. «Travaux» mars 1981.
- [15] Séismicité et conception des barrages. «Bulletin technique» No 46 du CIGB, 1983.
- [16] Recommandations relatives à l'inspection des barrages après les séismes. «Bulletin technique» CIGB, 1986.
- [17] Engineering aspects of the 1971 San Fernando earthquake. «Buid. Res. Div., Institute for applied technology» Washington D.C., 1972.
- [18] Contribution to the study of Friuli earthquake of May 1976. CNEN/ENEL, Commission on seismic problems...
- [19] *E. Glauser et al.*: Das Erdbeben in Friaul vom 6. Mai 1976 – Beanspruchung und Beschädigung von Bauwerken. «Schweizerische Bauzeitung» 94. Jahrg., Nr. 38, 1976.
- [20] Erdbebenrisikokarten der Schweiz – Division pour la sécurité des installations nucléaires, Office fédéral de l'énergie, 1977.
- [21] Erdbeben – Bemessungsspektren für schweizerische Kernanlagen. Office fédéral de l'énergie, 1984.
- [22] *A. Ziegler*: «Bemessungsbeben für Stauanlagen im schweizerischen Alpenraum» – Mitt. Nr. 130 des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der ETH, Zürich 1985
- [23] *D. Wepf et al.*: «Influence of cracking on the seismic response of concrete gravity dams» – Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol 5, 1984.
- [24] *P. Skrikerud und H. Bachmann*, IBK Zürich: «Rissbildung in Schwerkheitsmauern unter Erdbebeneinwirkung – Eine Modellbildung» – Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 37, 1985.
- [25] *W. Wittmann*: Ausverkauf der Sicherheit. Philosophia Verlag München, 1982.
- [26] *U. Stiefel et J. Schneider*: Was kostet Sicherheit? «Schweizer Ingenieur und Architekt» Nr. 47, 1985.

Adresse de l'auteur: *Pierre Dallèves*, ing. dipl. EPTZ, Société Anonyme l'Energie de l'Ouest Suisse, EOS, Case postale 1048, CH-1001 Lausanne.

Conférence lors du Symposium sur les tremblements de terre, Brigue, Suisse, avril 1986.