

CRITÈRES D'ANALYSE SISMIQUE DES GRANDS BARRAGES

Gilles J. Bureau

SOMMAIRE

Un bref examen des effets des tremblements de terre historiques sur les ouvrages déjà construits confirme qu'il faut inclure les charges sismiques dans le calcul des barrages. On constate que les méthodes d'analyse sismique varient d'une organisation et d'un bureau d'études à l'autre. On propose trois fonctions d'excitation sismique en vue du calcul des barrages par la méthode des éléments finis: le Séisme Nominal, le Séisme Majoré et le Séisme Induit. On discute en détail un procédé permettant de définir ces séismes, illustré par un exemple concret. Les fonctions d'excitation obtenues sont compatibles avec des spectres de réponse dépendant des conditions géologiques présentes à l'emplacement du barrage.

SYNOPSIS

A brief examination of the effects of past earthquakes on existing dams confirms the contention that seismic loading needs to be considered in the design of dams. At present, the methods of seismic analysis vary from one organization or design office to another.

It is proposed that three loading levels be used for seismic analysis of dams using the finite element method: an operating basis earthquake, a design basis earthquake, and loading from induced seismicity. The procedure for selecting the seismic inputs is described in detail and illustrated by a typical example. The excitation time histories thus obtained are compatible with the design response spectra that depend on the geological conditions at the dam site.

Gilles J. Bureau a obtenu le diplôme d'Ingénieur Civil des Mines en France et une maîtrise de l'Université de Californie à Berkeley. Il est "Senior Geotechnical Engineer" chez International Engineering Company, Inc., à San Francisco, et possède une licence d'Ingénieur du Génie Civil en Californie.

INTRODUCTION

Le gouvernement américain et les secteurs public et privé se sont récemment intéressés à la sécurité des barrages. L'"Acte d'Inspection des Barrages" ("Loi Publique 92-367", 1972) initiait le "Programme National de Sécurité des Barrages" et chargeait le "United States Army Corps of Engineers" de la responsabilité d'administrer l'inspection de tous les barrages, sauf ceux tombant déjà sous d'autres juridictions, telles que le "United States Bureau of Reclamation" (USBR) ou la "Tennessee Valley Authority" (TVA). Le désastre de Teton du 5 juillet 1976 rendait le grand public conscient des conséquences possibles de la rupture d'un grand barrage. Le 22 juin 1978, le "Président des Etats-Unis présentait au Congrès un rapport précisant la marche à suivre et nommant les groupes responsables de l'application de l'"Acte de Mitigation des Risques Sismiques" ("Loi Publique 95-124", 1977). Bien que la Loi 95-124 ne s'adresse point spécifiquement aux barrages, elle implique une participation accrue, à plusieurs niveaux du gouvernement, afin d'évaluer les caractères géologiques et sismo-tectoniques des "sites à usage critique ou planifié". L'important programme d'exploration des failles mis en place par le USBR pour le Barrage d'Auburn, en Californie, confirme ce nouvel intérêt...ainsi que les différences d'opinion qui en résultent.

Il semble surprenant qu'à l'heure actuelle peu de règlements ou procédures aient été institués pour préciser la marche à suivre pour le calcul sismique des barrages. On a conçu les vieux ouvrages en suivant des critères maintenant périmés, et, malgré sa désuétude, le calcul pseudo-statique reste encore très utilisé, probablement du fait de sa simplicité. On a de plus en plus fréquemment recours à la méthode des éléments finis, reconnue maintenant capable de fournir des résultats précis en vue de la conception des barrages. Malheureusement, si l'expression mathématique de la méthode des éléments finis devient de plus en plus complexe et efficace, les opinions divergent encore quant au choix des données d'entrée de ce modèle analytique. Il en résulte que plusieurs barrages d'une même région, mais placés sous des juridictions diverses, peuvent être analysés en fonction de critères très différents.

La présentation qui s'ensuit se limite au choix des sollicitations simulant les séismes. Sherard, Cluff et Allen (41)

ont déjà traité l'important problème des failles et glissements de failles pour les barrages.

BARRAGES CONSTRUIITS ET SEISMES HISTORIQUES

Peu de barrages se sont rompus pendant un séisme. Si on réalise qu'aux Etats-Unis seulement, il y a 49.000 barrages d'une hauteur supérieure à huit mètres ou retenant plus de 62.000 m³, le faible nombre d'ouvrages endommagés lors de tremblements de terre pourrait passer pour un palmarès étonnant. Aucun grand barrage ne s'est rompu des suites d'un glissement de faille au niveau de sa fondation. Pratiquement tous les dégâts subis ont résulté de secousses provoquées à l'emplacement du barrage par un séisme plus ou moins éloigné. Il faut bien sûr reconnaître qu'en certains cas, il s'en est fallu de peu que certaines ruptures partielles ne deviennent catastrophiques (par exemple Barrage d'Hebgen, dans le Montana, 17 Août 1959; ou Barrage Van Norman Inférieur, en Californie, 9 Février 1971). La rareté des ruptures met plus en relief le manque d'expérience qu'elle ne garantie les critères de calcul sismique utilisés pour les ouvrages concernés.

Seed et al (37) ont étudié en détail le comportement sismique des barrages en remblai, tandis que Kollgaard et Sharma (24) évaluaient celui des barrages en béton. La Figure 1 et le Tableau 1 ne sont qu'un rappel. On y montre la relation distance-magnitude pour les barrages qui ont été endommagés. On peut conclure de la Figure 1 que les barrages situés loin de l'épicentre de grands séismes peuvent aussi être touchés.

Les barrages présentés à la Figure 1 et au Tableau 1 regroupent ceux qui se sont trouvés exposés à des séismes naturels, et ceux pour lesquels on a plus ou moins admis l'éventualité de sismicité induite par la retenue. On connaît plusieurs exemples où le remplissage d'un profond lac de barrage a été accompagné ou suivi de tremblements de terre qui, exceptionnellement, dépassaient la magnitude 6 (Barrage de Koyna, en Inde; Barrage de Kremasta, en Grèce; Barrage d'Hsinfengkiang, en République Populaire de Chine). Un examen récent (32) de l'abondante littérature qui traite de ce sujet concluait que 16 cas concrets de sismicité étaient dus à la présence du lac, tandis qu'on ne pouvait totalement exclure cette éventualité pour 35 autres cas.

PROCEDES ACTUELS DE CALCUL SISMIQUE DES BARRAGES

La Commission Internationale des Grands Barrages concluait il y a quelques années que la méthode classique d'analyse pseudo-statique était largement utilisée (10). Il semble qu'en 1978 ce procédé reste encore le plus répandu dans de nombreux pays. Pourtant, de 1970 à 1978, on a admis que le calcul dynamique par la méthode des éléments finis fournissait le meilleur moyen de calculer les barrages pour les charges sismiques, si on l'utilisait de façon appropriée. La méthode des éléments finis est un outil flexible qu'on peut facilement orienter vers le calcul des contraintes

(barrages en béton), l'estimation des déformations résiduelles permanentes (barrages en remblai compacté sableux ou argileux) ou vers l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction (sables fins et limons non compactés). La Commission Internationale des Grands Barrages et sa filiale américaine (USCOLD) semblent approuver l'usage de cette méthode.

Bien qu'on utilise de plus en plus les méthodes précises et avancées, la conception des barrages demeure largement empirique; on se basera plus sur le comportement satisfaisant de barrages déjà construits que sur les résultats d'analyses détaillées (40). Les paragraphes suivants énumèrent quelques-unes des méthodes de calcul sismique des barrages en vigueur aux Etats-Unis.

"U.S. Bureau of Reclamation"

Jusqu'en 1972, le USBR calculait ses barrages par la méthode pseudo-statique. Maintenant, le USBR utilise des cartes de zonage sismique et la notion de période de retour et de faille causative afin de définir deux niveaux de séismes pour le calcul. Il est prévu qu'en 1979, près de 234 barrages contrôlés par le USBR auront été réanalysés par les méthodes dynamiques (11). Le USBR se sert de la méthode des éléments finis pour la plupart de ses nouveaux projets.

"U.S. Corps of Engineers"

Le "Corps of Engineers" classe les barrages en trois catégories (risque faible, important ou élevé) selon les pertes, économiques ou en vies humaines, qui pourraient résulter de leur défaillance (6). Le "Corps" se sert également d'une carte de zonage sismique des Etats-Unis* légèrement différente de celle publiée dans le "Uniform Building Code" (UBC) de 1976. Le "Corps" spécifie un coefficient sismique horizontal pour chaque zone, et attribue la valeur 0,15 g à la zone 4 de risque maximum. Les barrages situés dans les zones 3 et 4 doivent au minimum être calculés par la méthode pseudo-statique, à l'aide des coefficients sismiques horizontaux recommandés pour chaque zone. Tous les barrages à risque élevé situés en zone 4 et tous les barrages en remblai hydraulique et à risque élevé situés en zone 3 doivent être calculés par l'analyse dynamique.

"U.S. Nuclear Regulatory Commission" (NRC)

Certains barrages pouvant affecter la sécurité des centrales nucléaires sont classés comme structures de catégorie sismique I ("Seismic Category I") d'après les critères du NRC. Ces barrages sont placés sous la tutelle du NRC, qui ne donne le permis d'opérer que si la sécurité de ces barrages est évaluée par la méthode des éléments finis.

*TM5-809-10/NAVFAC P-355/AFM 88-3, Chapitre 13, Avril 1973

Gouvernements Locaux

Suivant les Etats, le calcul sismique et le contrôle de la sécurité des barrages s'échelonnent d'une absence totale à une vérification complète effectuée par un organisme spécialisé, tel la Division de Sécurité des Barrages ("State Division of Safety of Dams", DSD) en Californie. En Septembre 1978, sept Etats américains n'avaient encore aucune loi ou règlement se rapportant à la sécurité des barrages. Il est surprenant que cinq* de ces Etats intersectent les zones 3 ou 4 des cartes de zonage de l'UBC ou du "Corps of Engineers": de grands tremblements de terre s'y sont déjà produits.

Californie

La Californie a élaboré un programme de sécurité des barrages très complet. La Division de Sécurité des Barrages revoit et approuve le choix du Séisme Hypothétique Maximum ("Maximum Credible Earthquake") et du Séisme le plus Probable ("Maximum Expectable Earthquake") choisis pour le calcul de chaque grand barrage californien. La DSD exige que les barrages en remblai hydraulique soient calculés par la méthode des éléments finis. Bien qu'elle ne fournisse que peu d'indications permettant de définir ces séismes, la DSD, aidée par ses consultants, évalue les hypothèses posées. D'autres organismes, tels que le "California Water and Power Earthquake Engineering Forum" (CWPEEF) font la revue critique des méthodes d'analyse dont on peut disposer actuellement et définissent les objectifs recherchés. Il existe également en Californie une loi ambiguë qui énonce qu'un Ingénieur doit utiliser, sous peine d'être poursuivi, des procédés compatibles avec l'état actuel des connaissances (16). Il serait facile d'interpréter que cette loi implique l'analyse par le calcul dynamique et les éléments finis de pratiquement tous les grands barrages.

Sociétés d'Ingénierie

En général on admet que le calcul pseudo-statique fournit des résultats trompeurs, que ce soit pour les barrages en terre ou ceux en béton. Les bureaux d'études se servent de plus en plus de la méthode des éléments finis, surtout pour les grands barrages; ils accordent par contre parfois peu d'importance au choix des données d'entrée permettant de simuler les charges sismiques. Par exemple, on a utilisé dans le monde entier l'enregistrement du tremblement de terre d'El Centro, sans se soucier du fait que les caractères géologiques et tectoniques de l'emplacement où cet enregistrement a été obtenu ne correspondaient pas nécessairement aux conditions des sites retenus. Les paramètres qui définissent les charges sismiques découlent souvent de conclusions hâtives sur l'activité des failles, tirées de reconnaissances

*Alaska, Hawaii, Mississippi, Missouri, et Caroline du Sud. Les autres états sont la Georgie (Zone 2) et la Floride (Zone 1).

géologiques limitées à la proximité immédiate de la fondation du barrage; on porte peu d'intérêt au fait que le barrage pourrait être ébranlé par des séismes éloignés.

On a fréquemment évalué l'intensité des secousses possibles à partir de données incomplètes, sans utiliser de façon systématique toute l'information disponible. En conséquence, il a fallu parfois réviser des hypothèses insuffisamment documentées une fois que des recherches détaillées, en vue de satisfaire des critères plus stricts, eurent exposé de nouveaux indices (par exemple aux Etats-Unis dans la région du Nord-Ouest Pacifique); ou bien on remplacera des hypothèses devenues insuffisantes à la suite d'un séisme imprévu (Tremblement de terre d'Oroville, le 1er Août 1975; Tremblement de terre de San Fernando, le 9 Février 1971) par d'autres, choisies en hâte, parfois excessives ou irraisonnables.

Le Tableau 2 présente quelques exemples de fonctions d'excitation choisies aux Etats-Unis et dans d'autres pays pour le calcul des barrages. Ce type d'information est parfois confidentiel, et le Tableau 2 se limite à quelques cas.

On a maintenant tendance à retenir des critères d'analyse sismique de plus en plus sévères. On admet également que tous les grands barrages, même s'ils sont situés hors des zones sismiques reconnues, doivent posséder une certaine résistance aux tremblements de terre (10). La Commission de Sécurité des Barrages, du "National Research Council" (11) n'en conclut pas moins:

"...qu'il existe entre les organismes gouvernementaux ou privés s'occupant de la sécurité des barrages des différences d'opinion fondamentales quant à la terminologie de base, quant aux procédés ou critères utilisés et quant à l'importance des études nécessaires pour définir les séismes de conception à partir des données sismiques historiques et des facteurs géologiques ayant trait à l'évaluation de l'activité des failles. En règle générale, les procédés les plus récents de l'état actuel des connaissances n'ont pas été utilisés pour spécifier correctement les données sismiques dans le cas de presque tous les ouvrages déjà construits"

SEISME HYPOTHETIQUE MAXIMUM ET SEISME LE PLUS PROBABLE

La notion de Séisme Hypothétique Maximum et de Séisme le plus Probable représente un important progrès en vue de définir les charges sismiques. Le Séisme Hypothétique Maximum correspond au plus grand séisme qu'on peut postuler dans la région du barrage, compte-tenu des données géologiques et tectoniques connues. La force de ce séisme n'est pas un maximum absolu ("maximum possible") car les données sismiques ou géologiques peuvent être incomplètes. Le Séisme le plus Probable simule le plus grand tremblement de terre qui peut raisonnablement se produire dans la région du

barrage tant que ce dernier est en service (on estime généralement la durée de service à 100 ans).

Les définitions du Séisme Hypothétique Maximum et du Séisme le plus Probable ne contiennent aucune indication du risque encouru. L'importance accordée pour ces deux événements à la notion de faille causative les rend dépendants de la qualité et de la forme plus ou moins complète des données géologiques disponibles. Il en résulte souvent une diversité d'opinion d'experts, prévisible d'ailleurs car les critères de définition d'une faille "active" varient d'un organisme à l'autre. Par exemple, un glissement unique rend une faille "active", s'il s'est produit:

- Depuis moins de 11.000 ans, pour l'Etat de Californie
- Depuis moins de 35.000 ans, pour le "Corps of Engineers"
- Depuis moins de 35.000 ans, pour le NRC
- Depuis moins de 100.000 ans, pour le USBR

Si on les définit au niveau de la faille, peu de raisons justifient de différencier le Séisme Hypothétique Maximum du Séisme le plus Probable, car après tout, ces deux séismes peuvent se produire pendant que le barrage est en service. On a d'ailleurs déjà admis ce fait dans certains cas particuliers. L.C. Cluff a reconnu cette difficulté et a proposé une classification plus précise des failles basée sur leur degré d'activité (9). D'autre part, le Séisme Hypothétique Maximum et le Séisme le plus Probable sont spécifiés non point à l'emplacement du barrage, mais le long de la faille postulée causative, à son point le plus proche de l'ouvrage. Les fonctions d'excitation qui simulent ces deux séismes à l'emplacement du barrage sont obtenues en multipliant les accélérogrammes correspondant au Séisme Hypothétique Maximum et au Séisme le plus Probable par un facteur de réduction qui permet de tenir compte de l'atténuation des secousses avec la distance. Comme on utilise en général une seule loi d'atténuation, la méthode introduit un degré d'incertitude supplémentaire puisque la loi d'atténuation choisie peut ne pas être optimum aux distances considérées. De plus, le procédé ne prend pas en compte les écarts liés à la mise en équation de la loi d'atténuation.

AUTRE DEFINITION DES CHARGES SISMIQUES

Il semble préférable de définir les charges sismiques en fonction du comportement prévu pour le barrage. Cette approche se justifie du fait que la conception parasismique des ouvrages est destinée non pas à rendre ces derniers insensibles aux séismes, mais plutôt à réduire les conséquences des tremblements de terre à un niveau acceptable à la société. On propose trois types de charges sismiques pour la conception des barrages:

- Le Séisme Nominal ("Operating Basis Earthquake", OBE) correspond au niveau maximum d'ondes vibratoires susceptible de se produire à l'emplacement du barrage pendant et après lequel le barrage et ses équipements essentiels, ouvrages d'évacuation, évacuateur de crue, centrale, et machines doivent rester fonctionnels.
- Le Séisme Majoré ("Design Basis Earthquake", DBE) correspond au niveau maximum d'ondes vibratoires susceptible de se produire à l'emplacement du barrage, pendant et après lequel le barrage doit maintenir sa capacité de retenue.
- Le Séisme Induit par la retenue (Reservoir Induced Earthquake", RIE) correspond au niveau maximum d'ondes vibratoires susceptible d'être créé par la présence du réservoir à lac plein, et pendant lequel le barrage doit pouvoir opérer.

Le Séisme Nominal représente une intensité des secousses qui, dépassée, résulte en de lourdes pertes matérielles, réparations sérieuses ou arrêt de production d'énergie. Le degré de risque associé au Séisme Nominal doit rester plus ou moins constant d'un barrage à l'autre, puisque seuls des facteurs économiques sont en jeu.

Le Séisme Majoré représente un seuil qui, dépassé, peut résulter en des pertes de vies humaines. Le degré de risque associé au Séisme Majoré peut varier d'un barrage à l'autre. Par exemple un barrage construit en amont d'une région à forte densité de population devra être conçu avec plus de conservatisme qu'un autre érigé dans une région non-développée .

Le définition du Séisme Induit est délicate. D'expérience passée la hauteur du barrage et la capacité de la retenue doivent être suffisantes pour que le lac puisse engendrer des séismes. En outre, tous les réservoirs associés à des séismes induits ou reconnus comme tels se trouvaient dans des régions au potentiel tectonique instable. Typiquement, on a trouvé à ces sites l'un ou plusieurs des caractères suivants:

- Géologie complexe, failles ou plissements
- Activité volcanique récente
- Régions géologiquement jeunes
- Prédominance de terrains sédimentaires
- Bordures "douteuses" de régions stables
- Contraintes en-place élevées (tractions surtout)
- Epaisseur variable de la croûte terrestre (anomalies gravimétriques)
- Présence de roches et diaclases sensibles à la saturation

Les particularités énoncées ci-dessus semblent indiquer qu'un état de contraintes défavorable, en équilibre critique, devait exister à une certaine profondeur au sein de la masse rocheuse, avant même la construction du barrage. La mise en eau du réservoir a seulement déclenché les phénomènes d'instabilité. Il est raisonnable de limiter l'éventualité de sismicité induit aux barrages

très élevés (100 m au moins) et d'intensifier les recherches aux sites qui présentent l'un ou plusieurs des caractères cités.

Il faut traiter le Séisme Induit séparément des séismes Nominal et Majoré. Même si l'on suspecte que la plupart des cas de sismicité induite se sont produits dans des régions d'activité tectonique normale faible ou modérée, les variations de la fréquence d'occurrence des séismes après le remplissage de certains lacs, et l'amplitude inattendue des secousses observées justifient une étude indépendante.

Selon l'auteur, il ne semble exister qu'un cas publié de barrage-réservoir où l'on a émis la possibilité de sismicité induite dès le stade de la conception, celui du Barrage d'Auburn, en Californie. Les études effectuées ont indiqué que si le Tremblement de terre d'Oroville du 1er Août 1975 était provoqué par le réservoir du barrage d'Oroville (hypothèse, qu'on ne peut éliminer) la probabilité de ressentir au Barrage d'Auburn un séisme de magnitude supérieure ou égale à 5,7 passerait de moins de cinq pour cent à trente pour cent pendant la durée de service prévue pour l'ouvrage (31).

Les Séismes Nominal, Induit et Majoré ne sont qu'un moyen commode de définir les fonctions d'excitation à l'emplacement du barrage. Ces fonctions peuvent ou non simuler les secousses provoquées par le séisme de magnitude maximum envisageable pour la région considérée: ceci constitue une différence fondamentale par rapport au concept de Séisme Hypothétique Maximum et de Séisme le plus Probable. Le Séisme Nominal et le Séisme Majoré simulent des secousses au sol nu. Les données d'entrée correspondantes doivent donc être préalablement modifiées pour analyser les barrages susceptibles d'inter-agir avec leur fondation. Les paragraphes suivants présentent une méthodologie permettant de développer le Séisme Nominal, le Séisme Majoré et le Séisme Induit.

CHOIX DU SEISME NOMINAL

On propose les données suivantes pour spécifier le Séisme Nominal:

1. La valeur moyenne de la pointe d'accélération au rocher, à l'emplacement du barrage, qui a une probabilité de ne pas être dépassée pendant un siècle égale à 0,50.
2. Des spectres de réponse médians-plus-un-écart-type (spectres MSD)*, dépendant des conditions de terrain rencontrées, définis dans les directions horizontales et verticale, qui représentent les caractéristiques vibratoires du sol nu à l'emplacement de l'ouvrage.

*Probabilité associée = 84%, MSD = Median plus one Standard Deviation

Le choix d'une accélération comme valeur de calcul présente des inconvénients bien connus. L'accélération reste cependant la variable sismique la mieux étudiée, et peut être directement mise en équation. On l'utilisera donc pour définir le Séisme Nominal. La pointe d'accélération spécifiée est une valeur moyenne, qui peut être dépassée par de rares pointes d'accélération à fréquence très élevée, de peu d'intérêt pour l'ingénieur.

La définition du Séisme Nominal implique une analyse probabiliste. Une telle approche est satisfaisante car la période des accélérations calculées présente généralement le même ordre de grandeur que l'intervalle de temps écoulé depuis que les séismes ont commencé à être enregistrés ou physiquement ressentis: le réseau d'instruments de mesures date d'une quarantaine d'années environ, tandis que les tremblements de terre ont été décrits depuis quelques centaines d'années ou plus suivant les régions du globe.

On remarquera que le Groupe de Travail de l'ANS* 2.1 a proposé une définition similaire de la pointe d'accélération de l' "Operating Basis Earthquake" pour l'analyse des centrales nucléaires.

On dispose de plusieurs méthodes permettant d'analyser statistiquement les données sismiques (12, 26, 27). Toutes devraient fournir des résultats comparables, dans la mesure où:

- Les limites de la méthode utilisée sont connues
- Le modèle analytique simule correctement les données géologiques
- La loi d'atténuation utilisée représente des valeurs moyennes de la pointe d'accélération
- Les données utilisées sont aussi complètes que possible

On peut présenter les résultats de l'analyse statistique sous la forme tracée à la Figure 2. On y interpole directement la pointe d'accélération du Séisme Nominal.

On présente dans un autre paragraphe les spectres de réponse.

CHOIX DU SEISME MAJORE

Contrairement au Séisme Nominal, l'analyse statistique ne suffit pas à définir le Séisme Majoré. Les incertitudes liées aux événements à faible probabilité d'occurrence (30) rendent le procédé discutable, bien qu'on ait démontré, lors d'études récentes concernant des régions pour lesquelles les données historiques s'échelonnent sur de nombreux siècles (Chine, Iran), que les cycles ainsi calculés pour les grands séismes se comparaient favorablement à ceux obtenus par des calculs basés sur des données plus récentes (14). Une étude des glissements de la faille de San Andreas près de Pallett Creek, en Californie (42) indique également des intervalles entre

*ANS = American National Standards

grands tremblements de terre du même ordre de grandeur que ceux calculés par la méthode statistique dans la même région.

Des explorations géologiques détaillées, comme celles effectuées pour le Barrage d'Auburn (31), utilisées simultanément avec un degré d'activité des failles déterminé directement sur le terrain, fournissent le meilleur moyen de définir le Séisme Majoré. Malheureusement, pour des raisons de budget ou parce que les barrages concernés se trouvent dans des régions moins critiques que la vicinité de Sacramento, les études géologiques effectuées sont souvent beaucoup moins systématiques que celles d'Auburn. En outre, les nouveaux aménagements sont fréquemment situés dans des régions où la configuration sismo-tectonique est mal connue et où les données géologiques sont restreintes. Sélectionner une fonction d'excitation sismique d'après des présomptions sur l'activité de failles plus ou moins bien reconnues, pour lesquelles on a postulé l'étendue de la rupture, relève d'un excès ou d'un manque de prudence selon les emplacements choisis.

Le meilleur moyen de définir le Séisme Majoré semble être l'utilisation simultanée de critères géologiques et statistiques, puisque les deux approches sont complémentaires. On propose de spécifier le Séisme Majoré à l'aide des données ci-dessous:

1. Une pointe d'accélération définie comme le maximum de:

a. La plus élevée des valeurs moyennes de la pointe d'accélération au rocher, à l'emplacement du barrage, obtenues en atténuant le séisme de plus forte magnitude susceptible de se produire le long de chacune des failles, bien identifiées et présumées actives, se trouvant dans un rayon de 100 km autour du barrage.

b. La valeur moyenne de la pointe d'accélération au rocher, à l'emplacement du barrage, qui a une probabilité de ne pas être dépassée pendant un siècle égale à 0,95.

c. Le double de la pointe d'accélération du Séisme Nominal.

2. Des spectres de réponse médians-plus-un-écart-type, dépendant des conditions de terrain rencontrées, définis dans les directions horizontales et verticale, qui représentent les caractéristiques vibratoires du sol nu à l'emplacement de l'ouvrage.

Le niveau (a) d'accélération est utile quand l'information géologique est complète. Les failles qu'on doit considérer actives doivent se conformer aux critères d'activité du "Corps of Engineers" (entre autres un glissement unique en moins de 35.000 ans). L'accélération maximum à l'emplacement du barrage s'obtient à l'aide de paramètres d'atténuation se rapportant spécifiquement à la région considérée, ou en pondérant plusieurs valeurs fournies par des équations d'atténuation d'usage fréquent (13, 34, 46). On devra définir, chaque fois que possible, le degré d'activité des failles.

Le niveau (b) d'accélération définit le Séisme Majoré quand les données géologiques sont incomplètes ou lorsqu'on ne peut déterminer l'emplacement des failles avec précision (par exemple épaisse couche d'alluvions). Les calculs fournissent aussi une mesure du risque du niveau (a), ce qui est utile si on ne peut définir le degré d'activité des failles. La détermination simultanée des niveaux d'accélération (a) et (b) est un procédé comparable à ceux proposés ou utilisés pour le calcul de certains ouvrages critiques, tels les hôpitaux (4) ou les usines à gaz naturel liquéfié (19), où l'on utilise en parallèle des critères probabilistes et déterministes. La valeur 0,95 suggérée pour la probabilité du Séisme Majoré correspond à un niveau de risque que le maître de l'ouvrage ou le projeteur peuvent réduire s'ils le désirent.

Le niveau (c) d'accélération est une alternative pour certains emplacements de barrages à risque sismique modéré et à géologie douteuse.

CHOIX DU SEISME INDUIT

À l'heure actuelle on connaît mal les caractères physiques des séismes induits. Bien qu'ils ne soient généralement pas traités séparément des séismes "naturels" ressentis dans le même secteur, ces séismes semblent avoir plusieurs points communs. Ce sont des tremblements de terre de magnitude faible ou modérée (jusqu' à 6,5). La durée des secousses est courte, quelques secondes, et ces séismes se produisent en essaims. La période de décroissance des après-chocs peut durer plusieurs années, pendant lesquelles se produisent des milliers de secousses. La magnitude du plus fort des après-chocs peut être proche de celle de la secousse principale. Les épicentres de ces séismes, qui sont d'ailleurs peu profonds, s'alignent souvent le long de failles situées non loin de la retenue. Dans la plupart des cas où l'on a accepté comme telle l'éventualité de sismicité induite, on a remarqué une corrélation, parfois excellente, entre le niveau de la retenue et le nombre de secousses ressenties. La secousse majeure s'est produite à lac plein, ou consécutivement à un remplissage ou une vidange rapides. Il a fallu attendre parfois plusieurs années avant que ne se manifestent les secousses mais très souvent, l'activité maximum s'est produite dans les deux années suivant le premier remplissage. Comme les séismes induits sont peu profonds et sont engendrés très près du barrage, ils peuvent produire des niveaux d'accélération élevés et des secousses aux caractéristiques de fréquence particulières. On suggère les critères suivants afin de spécifier le Séisme Induit:

1. Une pointe d'accélération définie comme le maximum de:
 - a. La valeur moyenne de la pointe d'accélération, au rocher, à l'emplacement du barrage, qui a une probabilité de ne pas être dépassée pendant un siècle égale à 0,75.
 - b. Une fois et demi la pointe d'accélération du Séisme Nominal.

c. Cinquante pour cent de l'accélération de la pesanteur (0,50 g).

2. Des spectres de réponse, dans les directions horizontales et verticale, caractérisant les vibrations du sol qu'on peut raisonnablement supposer résulter d'un séisme induit.

On reconnaît qu'à l'heure actuelle l'information permettant de définir le Séisme Induit est restreinte. Les critères proposés sont basés sur l'hypothèse suivante: si un barrage se trouve à un emplacement présentant certains des caractères favorables à la sismicité induite, la probabilité d'occurrence de ces séismes sera sans doute supérieure à celle du Séisme Majoré. Les cinquante pour cent d'accélération pourraient résulter d'un séisme de magnitude 5 à 6,5 se produisant au voisinage immédiat du barrage.

CARACTERISTIQUES SPECTRALES DES FONCTIONS D'EXCITATION

Séisme Nominal et Séisme Majoré

Des spectres de réponse MSD dépendant des conditions de terrain, calculés à 5% d'amortissement critique, définissent les séismes Nominal et Majoré. Comme les pointes d'accélération de ces deux séismes correspondent à des valeurs moyennes, on obtient un degré de conservatisme nécessaire et suffisant en les utilisant pour caler les spectres MSD (13).

Les investigations récentes de Seed et al (38) ou Mohraz (28) ont montré que les spectres de réponse au sol nu ont des formes très différentes suivant la nature des terrains rencontrés. On a obtenu les formes spectrales dans ces deux études en analysant statistiquement les spectres de réponse calculés à partir d'enregistrements de vrais séismes, et en comparant, à chaque fréquence, les rapports entre les réponses maximum et les pointes normées de la secousse au sol (accélération, vitesse et déplacement). Les données utilisées par ces deux auteurs provenaient surtout de l'ouest des Etats-Unis, mais on peut appliquer avec suffisamment d'exactitude ces formes spectrales à d'autres sites; exception faite de sites très particuliers, comme par exemple les épaisses couches d'argiles molles de la ville de Mexico, mais qui ne présentent que peu d'intérêt pour les barrages. On préfère se servir ici de spectres dépendant des conditions de terrain rencontrées plutôt que d'autres utilisables en toutes circonstances, car ces derniers peuvent être excessifs ou insuffisants à certaines fréquences (par exemple, critères sismiques pour la conception des centrales nucléaires, 27). On démontre ceci graphiquement à la Figure 3, où l'on compare les spectres MSD horizontaux des sites au rocher, calculés à 5% d'amortissement, au spectre du NRC valable pour le même amortissement. On a tracé également les spectres de réponse des deux composantes horizontales du tremblement de terre d'El Centro, qui ont été maintes fois utilisées pour analyser des barrages; elles fournissent un exemple de l'inaptitude d'un enregistrement unique de vrai séisme à fournir les fonctions d'excitation appropriées.

On montre aux Figures 4 et 5 les spectres horizontaux développés respectivement par Mohraz et Seed pour d'autres conditions de terrain. Comme les pointes d'accélération définissant le Séisme Nominal et le Séisme Majoré sont supposées se produire au rocher, il est nécessaire d'ajuster ces dernières pour qu'elles correspondent aux conditions à la surface du sol quand des alluvions ou d'autres terrains sont en place. On peut utiliser dans ce but une corrélation développée par Seed et présentée à la Figure 6.

Les spectres de réponse horizontale de Seed et Mohraz se comparent favorablement et il n'y a guère de raison d'utiliser les uns plutôt que les autres: tous spécifient de façon acceptable le Séisme Nominal et le Séisme Majoré une fois calés correctement.

Mohraz seul a présenté des spectres de réponse verticale (28) qui sont tracés à la Figure 7. Ces spectres serviront à définir la composante verticale du Séisme Nominal et du Séisme Majoré, en les calant aux deux-tiers de la pointe d'accélération horizontale correspondante (ce procédé diffère de celui suggéré par le NRC, où le spectre de réponse verticale est calé à la pointe d'accélération horizontale, ce qui fournit un spectre vertical excessif à pratiquement toutes les fréquences).

Séisme Induit

Peu de séismes supposés induits par un lac de barrage ont produit des enregistrements complets. Les séismes du barrage d'Hsinfengkiang, en République Populaire de Chine, sont probablement les seuls à avoir été enregistrés et surveillés pendant une période suffisamment longue (39). Ils présentent des caractères étonnants, surtout au point de vue fréquence. La période fondamentale de ces séismes se trouve entre 0,05 et 0,08 secondes, pour les composantes horizontales ou verticale. Les spectres de Fourier et les spectres de réponse en accélération calculés à partir des enregistrements de ces séismes montrent des pointes très élevées dans cette plage de périodes. L'amplification maximum se produit donc à des fréquences environ trois plus élevées que la fréquence fondamentale des séismes "naturels". On a également obtenu des enregistrements près du barrage de Koyna pendant le séisme du 11 Décembre 1967, bien qu'une partie de ces accélérogrammes soit difficile à interpréter à cause de la faiblesse de l'enregistrement physique. Krishna et al (25) en ont codé la version "officielle" que l'auteur a utilisée. Les spectres de réponse correspondants possèdent un important niveau d'énergie à fréquence élevée et sont très bas aux longues périodes.

On montre à la Figure 8 le spectre moyen à la fondation du barrage d'Hsinfengkiang calculé pour les enregistrements de magnitude 4,5 environ, et les deux spectres horizontaux du séisme de Koyna. Tous ces spectres sont normés à 0,2 g et calculés à 5% d'amortissement. On les compare aux spectres au rocher de Seed et Mohraz. La ressemblance entre les spectres d'Hsinfengkiang et de Koyna est remarquable, tous sont simultanément plus hauts ou plus bas que

les spectres au rocher de Seed et Mohraz, suivant la plage de fréquences considérée.

Il est probable que les spectres d'Hsinfengkiang et de Koyna aient été influencés par la présence des barrages, et soient donc des spectres d'inter-action plutôt que des spectres au sol nu. Peut-être aussi leur forme spectrale particulière provient de la proximité du foyer des séismes, plutôt qu'elle ne caractérise la sismicité induite. Quoiqu'il en soit, et comme on l'a observé à Hsinfengkiang et Koyna, les barrages-poids et les barrages à contreforts, probablement à cause de leur fréquence fondamentale élevée*, semblent être particulièrement sensibles à ce type de secousses.

On a développé une forme spectrale utilisable au niveau de la fondation pour les composantes horizontales du Séisme Induit en lissant un spectre moyen dérivé des spectres d'Hsinfengkiang et de Koyna. Pour garder un conservatisme constant en vue de l'analyse on a relevé ce spectre en utilisant les rapports d'amplifications entre spectre médian et spectre médian-plus-un écart-type, au rocher, calculés par Mohraz (28). Le spectre relevé est tracé à la Figure 9 et définit le spectre de réponse horizontale du Séisme Induit.

Les composantes horizontales et verticale des accélérogrammes obtenus à Hsinfengkiang et à Koyna étaient très comparables, en intensité spectrale et en pointe d'accélération. On propose donc d'utiliser le spectre présenté à la Figure 9 pour la composante verticale, et de le caler en se servant d'une pointe d'accélération verticale égale à la pointe d'accélération horizontale.

Le spectre de réponse proposé pour le Séisme Induit n'est basé que sur des données restreintes. Il faudra le vérifier quand d'autres enregistrements seront disponibles et quand on aura mieux étudié le phénomène de sismicité induite.

DEVELOPPEMENT DES FONCTIONS D'EXCITATION

Les critères de définition du Séisme Nominal, du Séisme Majoré et du Séisme Induit impliquent que l'on engendre des accélérogrammes compatibles avec les spectres proposés pour chaque séisme. On analyse le barrage par intégration directe des équations du mouvement, ou en additionnant les réponses des modes de vibration

-
- *1. Koyna, T_0 de l'ordre de 0,10 s (29).
 2. Hsinfengkiang, T_0 (horizontale) varie de 0,16 s à 0,23 s, suivant le niveau du lac. Le facteur de participation de masse du second mode (T_2 entre 0,08 s et 0,10 s) est d'ailleurs plus élevé que celui du premier mode (28).

qui contribuent à l'essentiel de la réponse dynamique de l'ouvrage. Ces méthodes nécessitent qu'on choisisse la durée des secousses. On peut estimer la durée du Séisme Nominal et du Séisme Majoré à partir des données sismiques applicables à la région considérée ou utiliser les corrélations durée-magnitude rassemblées par Chang et Krinitzsky (5). On suggère une durée maximum de six secondes pour le Séisme Induit.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'engendrer des fonctions d'excitation sismique compatibles avec des spectres de réponse imposés. On peut utiliser celle mise au point par Gasparini et Vanmarcke (20), où le mécanisme de génération des accélérogrammes consiste à superposer des ondes de forme sinusoïdale d'amplitude fixée mais de déphasage aléatoire. D'autres procédés permettent de conserver les déphasages de séismes réels (15), mais ne semblent pas justifiables pour l'analyse de systèmes à nombreux degrés de liberté comme les barrages, sauf peut-être si on désire simuler des secousses à faible distance du foyer. Les recherches actuelles se concentrent sur la propagation des fractures et les dislocations stochastiques en chaîne simulant les glissements de failles par un processus en trois dimensions (33, 49). Ces nouveaux procédés, lorsqu'ils auront dépassé le stade de la recherche, fourniront une excellente alternative pour améliorer ou compléter les critères présentés, surtout pour ceux des sites de barrages où la configuration et l'inclinaison des failles sont bien définies.

Quand les fonctions d'excitation sismiques sont artificielles, elles reproduisent de façon plus ou moins exacte les spectres de réponse spécifiés pour les séismes Nominal, Majoré et Induit. Il convient donc de préciser les intervalles de période auxquels on doit calculer les spectres et de définir une tolérance pour l'écart entre spectres calculés et spécifiés. On propose de calculer les spectres à un minimum de 15 points par cycle de l'échelle logarithmique des périodes entre 0.01 s et 10 s. Au plus cinq des points calculés peuvent descendre sous le spectre spécifié, avec une tolérance maximum de dix pour cent.

L'utilisation d'un seul accélérogramme par composante de séisme est acceptable pour l'analyse des barrages, quoiqu'on reconnaisse que l'usage de plusieurs accélérogrammes fournirait une sécurité supplémentaire. Il se peut qu'imposer une forme spectrale crée des difficultés nouvelles quand on s'intéresse à la liquéfaction des barrages en remblai, puisqu'un accélérogramme à spectre fixé peut avoir un nombre de "cycles équivalents" différent de celui d'enregistrements réels. Il conviendra donc d'être prudent quand on définira les critères de liquéfaction et la durée du séisme artificiel pour ce type d'études.

BESOINS DE L'ANALYSE

Il n'est pas toujours nécessaire d'analyser chaque barrage pour les trois séismes qu'on vient de définir. Les besoins de l'analyse sont contrôlés par le type de barrage, par son emplacement par rapport aux zones sismiques et par le degré de risque de

l'ouvrage. Dans les zones à sismicité faible ou modérée, les barrages conçus à l'heure actuelle peuvent sans aucun doute rester fonctionnels durant et après un séisme équivalent au Séisme Nominal. Il n'est pas nécessaire de calculer les barrages en terre pour le Séisme Induit tel qu'on le définit à cause des fréquences relativement peu élevées auxquelles ces barrages répondent. D'expérience passée, il ne semble pas obligatoire d'envisager le Séisme Induit pour les barrages de moins de 100 m de haut, ou pour recalculer de vieux ouvrages qui, jusqu'à présent, n'ont pas montré d'activité sismique liée à la présence de la retenue.

On suggère au Tableau 3 comment envisager les charges sismiques dans le cas des barrages à risque élevé (classification du "Corps of Engineers"). Ce Tableau satisfait les besoins minimum. La discussion de la combinaison des charges sismiques à d'autres charges, telles que la pression hydrostatique, les crues ou le gel, dépasse le cadre de cette étude.

Les composantes de l'excitation à inclure dans l'analyse dépendent du type de barrage. A cause de leur géométrie, on doit calculer les voûtes en trois dimensions. Trois composantes orthogonales de l'excitation sismique seront donc nécessaires. On calcule en général les barrages-poids et les barrages en remblai en deux dimensions seulement. Si on utilise deux composantes horizontales, celles-ci devront être statistiquement indépendantes et avoir la même valeur de pointe.

Les critères d'analyse sismiques présentés ont certains points communs avec ceux utilisés pour calculer les centrales nucléaires. On fait au Tableau 4 la comparaison entre les Critères recommandés par le NRC et ceux discutés dans le présent article.

EXEMPLE

On applique les critères présentés à un barrage fictif de 110 m de haut, fondé au rocher, situé arbitrairement au centre - est de la Sierra Nevada (Zone 3 selon l'UBC). La faille active la plus proche, la faille de la Vallée d'Owens ("Owens Valley Fault") passe à 60 km du barrage projeté. Cette faille a glissé en 1872 lors d'un grand séisme (Magnitude 8,25). On supposera que les explorations géologiques confirment qu'aucune autre faille n'a bougé depuis moins de 35.000 ans dans un rayon de 100 km autour du site. La magnitude 8,3 représente le séisme maximum que l'on peut associer à la faille de la Vallée d'Owens d'après l'évidence géologique. Une activité sismique modérée existe dans la région, le plus proche séisme (magnitude 5) est centré à 30 km du barrage. L'évaluation du risque sismique au site considéré a fourni la courbe de la Figure 2. Le Tableau 5 résume les différentes étapes permettant de définir les pointes d'accélération des séismes Nominal, Majoré et Induit. On ne considérerait le Séisme Induit que pour une voûte ou un barrage-poids.

Un séisme de magnitude moyenne, situé dans un rayon du barrage à peu près égal à la distance entre ce dernier et le plus proche

épicentre historique, pourrait produire le niveau d'accélération du Séisme Nominal. Mais cette pointe d'accélération pourrait également résulter d'une secousse de magnitude 7,5 environ, centrée le long de la faille de la Vallée d'Owens. Ce second séisme serait le plus critique à cause de sa durée plus longue. Un raisonnement analogue conduit à conclure qu'un choc de magnitude 8,3 le long de la même faille serait le plus sévère dans le cas du Séisme Majoré. On a donc choisi des durées respectives de 40, 60 et 6 secondes pour les trois fonctions d'excitation, et on a engendré des accélérogrammes compatibles avec le spectre au rocher proposé par Mohraz. On a utilisé en ce but le programme d'ordinateur codé par Gasparini et Vanmarcke (20). La Figure 10(a) compare les spectres calculé et spécifié pour l'une des composantes du Séisme Majoré. La Figure 10(b) montre l'accélérogramme correspondant.

CONCLUSION

Le choix des fonctions d'excitation pour le calcul dynamique des barrages doit résulter d'une décision prise conjointement par le projeteur, les géologues, les sismologues, le maître de l'ouvrage et les organismes concernés. L'usage de la méthode des éléments finis nécessite un choix approprié des données d'entrée. Une erreur dans ce choix fausse l'ensemble du calcul. Si l'usage de règles strictes, comme on l'impose maintenant pour les centrales nucléaires, ne résout pas tous les problèmes ni ne répond de façon satisfaisante à toutes les questions posées, il est nécessaire de disposer de quelques indications permettant de faire le calcul sismique des barrages, surtout quand les données sismiques ou géologiques sont éparses. On a proposé une méthode permettant de choisir trois séismes pour le calcul dynamique des barrages. Les critères proposés concilient certaines divergences d'opinion qui existent actuellement quant aux moyens de définir les charges sismiques. Ces critères devraient satisfaire l'Ingénieur, le grand public et les organismes de contrôle car ils exigent que les barrages soient calculés en utilisant les méthodes les plus modernes et les plus efficaces. Ils définissent les fonctions d'excitation en tenant compte de façon systématique du risque de dépasser les valeurs numériques retenues pour les paramètres de l'analyse.

REFERENCES

1. Ambraseys, N.N. (1960) "On the Seismic Behavior of Earth Dams", 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, July 11-18, Proc., Vol. I, pp 331-358.
2. ANS 2-1 Working Group (1975) "Guidelines for Determining the Vibratory Ground Motion for the Design Earthquake of Nuclear Facilities", Draft, January, 30 pp.
3. Bell, J.M., Hoffman, R.E. (1978) "Design Earthquake Motions Based on Geologic Evidence" Earthquake Engineering and Soil Dynamics Specialty Conference, ASCE, Pasadena, June 19-21, Proc., Vol. I, pp 231-271.
4. California Administrative Code (1973)-Title 17 and 24, "Hospital Regulations".
5. Chang, F.K.; Krinitzky, E.L. (1977) "State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States - Report 8" U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Misc. Paper S-73-1, December, 58 pp.
6. Chief of Engineers (1975) "Recommended Guidelines for Safety Inspection of Dams". National Program of Inspection of Dams, Vol. I, Appendix D, Dept. of the Army, Washington D.C., 38 pp.
7. Chopra, A.K.; Chakrabarti, L. (1971) "The Koyna Earthquake of December 11, 1967 and the Performance of Koyna Dam". U. of California, Berkeley, Report EERC 71-1, April.
8. Civil Engineering - ASCE (1978) "Los Angeles Reservoir is Safe from Earthquakes", June Issue, pp 88-89.
9. Cluff, L.C. (1978) "Geologic Considerations for Seismic Microzonation". 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, San Francisco, Nov. 26-Dec. 1, Proc., Vol I, pp 135-152.
10. Committee on Earthquakes, ICOLD (1975) "A Review of Earthquake-Resistant Design of Dams" Bulletin 27 - Commission Internationale des grands barrages (Mars) 106 pp.
11. Committee on the Safety of Dams (1977) "Safety of Dams, a Review of the Program of the U.S. Bureau of Reclamation for the Safety of Existing Dams, Rept. to U.S. Dept. of Interior, Nat. Ac. of Sciences, Washington, D.C. 70 pp.
12. Cornell, C.A. (1971) "Probabilistic Analysis of Damage to Structures under Seismic Loads", Dynamic Waves in Civil Engineering, Wiley Interscience, pp 473-493.

13. Donovan, N.C. (1978) "Soil and Geologic Effects on Site Response". 2nd International Conf. on Microzonation for Safer Construction Research and Application. San Francisco, Nov. 26-Dec. 1, Proc., Vol. I, pp 55-29.
14. Donovan, N.C.; Bornstein, A.E. (1978) "Uncertainties in Seismic Risk Procedures", ASCE, Journ. of the Geo. Engr. Div., No. GT 7, Paper 13896, July, pp 869-887.
15. Donovan, N.C., Valera, J.E; Beresford, P. J. (1975) "Statistical Uncertainty of Design Based on Smoothed Response Spectra, Proc. of the U.S. National Conf. on Earth. Eng., June, Ann Arbor, Mich., EERI publisher, pp 53-59.
16. Downey, K. (1978) Communication made at the Conference on "New Perspectives on the Safety of Dams", Stanford University, California, 28 August-1 September.
17. Duke C.M. (1960) "Foundations and Earth Structures in Earthquakes", 2nd World Conference in Earthquake Eng., Tokyo, July 11-18, Proc., Vol. I, pp 435-455.
18. Eisenberg, A.; Husid, R; Luco, J.E. (1976) "The July 8, 1971 Chilean Earthquake" Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 62, N°1, February pp 423-450.
19. Federal Register (1977) "Liquified Natural Gas Facilities (LNG), Federal Safety Standards" Proposed Rules - Vol. 42, N°77, April 21.
20. Gasparini, D.A.; Vanmarcke, E.H. (1976) "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Eng., Publication No. R76-4, January, 65 pp.
21. Gordon, B.B.; Dayton, D.J.; Sadigh, K. (1974) "Seismic Stability of Upper San Leandro Dam, Journal of the Geotechnical Div. ASCE, GTS, May, pp 523-545.
22. International Commission on Large Dams (1974) "Lessons from Dam Incidents", Imprimerie Louis-Jean, Paris, 1069 pp.
23. International Engineering Company, Inc., Engineering Files, Proprietary Information.
24. Kollgaard, E.B., Sharma, R.P. (1976) "Seismic Stability Evaluation of Existing Concrete Dams" the Evaluation of Dam Safety Conf., Proc., Pacific Grove, CA Nov. 28-Dec. 3, ASCE Publisher, pp 343-376.
25. Krishna, T.; Chandrasekaran, A.R.; Saini, S.S. (1969) "Analysis of Koyna Accelerogram of December 11, 1967", Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59, No. 4, August, pp 1719-1731.

26. McGuire, R.K. (1976) "Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis", U.S.G.S. Open-File Report 76-67, 92 pp.
27. McGuire, R.K. (1978) "Frisk-Computer Program for Seismic Risk Analysis using Faults as Earthquake Sources", USGS Open File Report 78-1007.
28. Mohraz, B (1976) "A Study of Earthquake Response Spectra for Different Geological Conditions", Bull. Seism. Soc. Am., Vol 66, No. 3, June, pp 915-935.
29. Nakayama, A. et al (1964) "Observations of Dams during Earthquakes" 8th Congress, ICOLD, Edinburgh, G.B., Proc., Q24, R15, pp 261-294.
30. Okrent, D. (1975) "A Survey of Expert Opinion on Low Probability Events", U. of California, Los Angeles, Technical Report No. UCLA-Eng-7515, February.
31. Packer, D.R. et al (1978) "Auburn Dam - A Case History of Earthquake Evaluation for a Critical Facility", 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, San Francisco, Nov 26-Dec. 1, Proc. Vol. I, pp 457-470.
32. Packer, D.R., Lovegreen, J.R.; Born J.L. (1977) "Reservoir Induced Seismicity, Earthquake Evaluation Studies of the Auburn Dam Area", Report to the USBR, Denver, Colorado, by Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, CA, v. 6, 345 pp.
33. Savy, J; Shah H.C. (1978) "Determination of Seismic Design Parameters - a Stochastic Approach", 6th European Conf. on Earthquake Eng., Dubrovnik, Yu., September 18-22, Proc. Vol. 1, pp 191-197.
34. Schnabel, P.B.; and Seed, H.B. (1973) "Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States", Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 63, No. 2, April, pp 501-516.
35. Seed, H.B.; Lee, K.L.; Idriss, I.M. (1969) "Analysis of Sheffield Dam Failure", Journ. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, No. SM6, Nov. pp 1453-1490.
36. Seed, H.B.; Lee, K.L.; Idriss, I.M.; Makdisi, F. (1973) "Analysis of the Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971", U. of California, Berkeley, Report EERC 73-2, June, 150 pp.
37. Seed, H.B.; Makdisi, F.E.; De Alba, P. (1978) "Performance of Earth Dams During Earthquakes", ASCE, Journal of Geo. Eng. Div., GT 7, July, pp 967-995.
38. Seed H.B.; Ugas, C.; Lysmer, T. (1974) "Site-dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design", U. of California, Berkeley, Report No. EERC 74-12, November.

39. Sheng-Chung-Kang, et al (1973) "Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and Their Effect on the Hsinfengkiang Dam", Congrès du Comité International des Grands Barrages, Madrid, May.
40. Sherard J.L.; Cluff, L.S.; Allen, C.R. (1974) "Potentially Active Faults in Dam Foundations", Geotechnique 24 No. 3, pp 367-428.
41. Sherard, J.L.; Woodward, R.J.; Gizienski, S.F.; Clevenger, W.A. (1963) "Earth and Earth-rock Dams", John Wiley and Sons, Inc., New York, 3rd printing, 1967, 725 pp.
42. Sieh, K.E. (1977) "Prehistoric Large Earthquakes Produced by Slip on the San Andreas Fault at Pallett Creek, California", Journal of Geophysical Research, V. 82, N°B8, pp 3907-3939.
43. Smith, E.S. (1969) "Tailings Disposal and Liquefaction", Society of Mining Engineers, AIME, Transactions, Vol. 244, June, pp 179-187.
44. Stroppini, E.W. (1977) "The Oroville Earthquake and Oroville Dam" The Evaluation of Dam Safety Conf., Asilomar, CA, Nov. 28-Dec. 3, 1976, ASCE publisher, N.Y. pp 301-327.
45. Thèvenin, J; Le May, Y. (1964) "Quelques Constatations Particulières Faites sur Les Déformations de Barrages sous l'effet de la charge d'eau, de la température, des séismes", 8th Congress ICOLD Edimburg, GB, May, Proc. Question 29, R. 12, Vol. II, pp 207-218.
46. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1976) "Correlations of Peak Acceleration, Velocity and Displacement with Earthquake Magnitude, Distance and Site Conditions", Earthquake Engineering and Struct. Dyn., Vol. 4, 1976, pp 455-471.
47. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1973)-Directorate of Regulatory Standards "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants." Regulatory Guide 1-60.
48. Walters (1964) "Damage by Earthquake to Blackbrook Dam, Loughborough, England", 8th Congress ICOLD, Edimburgh, G.B., May, Proc., Vol. II, Q29, R1, pp 1-30.
49. Wiggins, R.A. et al (1978) "Modeling Strong Motion for Major Earthquakes", 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, San Francisco, Nov 26-Dec. 1, Proc., Vol II, pp 693-699.

Tableau 1: Barrages endommagés par des séismes

CASE #	DAM NAME AND LOCATION	HEIGHT (FT)	DAM TYPE	SEISMIC EVENT	MAGNITUDE	DISTANCE (KM) (epicenter) ↓ distance to fault	DAMAGE EVALUATION										REFERENCE	
							Minor	Moderate	Major	Collapse	Settlements	Slides	Liquefaction	Cracks	Crest offset	Piping		Other
1.	Augusta (Ca., USA)	-	E	1886-09-31	7.0	180												17
2.	San Andreas (Ca., USA)	95	E	1906-04-19	8.3	0*												37
3.	Old San Andreas (Ca., USA)	28	E	1906-04-19	8.3	0*												37
4.	Saratoga (Ca., USA)	-	E	1906-04-19	8.3	0*												37
5a.	Upper Howell (Ca., USA)	36	E	1906-04-19	8.3	0*												37
5b.	Lower Howell (Ca., USA)	38	E	1906-04-19	8.3	0*												37
6.	Crystal Springs (Ca., USA)	90	E	1906-04-19	8.3	0.4*												37
7.	Piedmont N°1 (Ca., USA)	52	E	1906-04-19	8.3	30*												37
8.	Volcano Lake (Mexico)	12	E	1915-06-22	5.3	0*												1
9.	Murayama Shimo (Japan)	52	E	1923-09-01	8.2	18												29
10.	Upper Murayama (Japan)	79	E	1923-09-01	8.2	18												1
11.	Ono (Japan)	122	E	1923-09-01	8.2	90												22
12.	Tokyo W.S. (Japan)	79	E	1923-09-01	8.2	24												27
13.	Sheffield (Ca., USA)	25	E	1925-06-29	6.3	11.2												37
14.	Barahona (Chile)	200	T	1928-12-01	8.4	160												43
15.	Chatsworth N°2 (Ca., USA)	44	HF	1930-08-30	5.25	1												41
16.	Nizhne Svyrskaya (USSR)	59	M	1935-	Exp.	0*												29
17.	Volcano Lake (Mexico)	19	E	1940-05-18	7.1	0*												17
18.	Cogotl (Chile)	246	R	1943-	8.3	16												1
19.	Otanike (Japan)	88	E	1946-12-21	7.2	80												22
20.	Honenike (Japan)	98	AB	1946-12-21	7.2	50												10
21.	Hosorogi (Japan)	28	E	1948-06-28	7.3	4.8												1
22.	Dry Canyon (Ca., USA)	64	HF	1952-07-21	7.7	68												37
23.	Buena Vista (Ca., USA)	17	E	1952-07-21	7.7	28												41
24.	South Haiwee (Ca., USA)	90	HF	1952-07-21	7.7	145												41
25.	Coleman (Nev., USA)	-	M	1954-07-06	6.7	24												37
26.	Rogers (Nev., USA)	-	M	1954-07-06	6.7	60												37
27.	Ponteba (Algeria)	59	CG	1954-09-09	6.75	3.5												45
28.	St. Mary's (Ca., USA)	50	M	1955-10-23	5.4	3												41
29.	Blackbrook (Great Britain)	68	CG	1957-02-11	5.6	6.4												48
30.	Hebgen (Mon., USA)	121	E	1959-08-17	7.6	0.5*												29
31.	Mihoro (Japan)	426	R	1961-08-19	7.0	17												37
32.	Hsinfengkiang (China)	344	CB	1962-03-19	6.1	1.1												5
33.	Eklutna (Ak., USA)	20	M	1964-03-27	8.5	100												37
34.	El Cobre (Chile)	-	T	1965-05-28	7.1	35												18
35.	Koyna (India)	338	CG	1967-12-11	6.4	3												7
36.	Vir (India)	79	E	1967-12-11	6.4	8												22
37.	Lower San Fernando (Ca., USA)	140	HF	1971-02-09	6.5	12.8												37
38.	Upper San Fernando (Ca., USA)	80	HF	1971-02-09	6.5	12.8												37
39.	Salamanca (Chile)	-	E	1971-07-08	7.5	110												18
40.	Illapel (Chile)	-	T	1971-07-08	7.5	100												18
41.	Limahuida (Chile)	-	T	1971-07-08	7.5	100												18
42.	Perez Caldera (Chile)	150	T	1977-11-24	7.4	350												23

Tableau 2: Données d'entrée simulant les charges sismiques

Name and Location	Height (ft)	Type	Design Earthquakes Parameters				Comments	Reference
			Magnitude	Distance (km)	Duration (s)	Max. Acc. (g)		
Taktogul (USSR)	700	CG	-	-	4	0.22	Jureka record (1954-12-21)	10
Hendrie Verword (S.A.)	-	-	-	-	10	0.29	Santa Barbara record (1941-06-30)	10
PK Le Roux (S.A.)	-	-	-	-	4	0.24	Santa Barbara record (1941-06-30)	10
Massingir (Mozambique)	-	-	-	-	30	-	El Centro record (1940-05-18)	10
New Don Pedro (USA)	583	-	-	-	60	0.08	Pasadena record (1952)	10
Oroville (USA)	774	E	-	-	-	-	El Centro record (1940-05-18)	10
Oroville (USA)	774	E	6.5	-	-	0.60	Synthetic Taft-Pacoima (reanalysis)	44
W.A.C. Bennett (Canada)	600	E	-	-	-	0.33	El Centro record (1940-05-18)	10
Cachi (Costa Rica)	262	-	-	-	-	-	El Centro record (1940-05-18)	10
Sheffield (USA)	25	E	-	-	15	0.15	El Centro record (1940-05-18) (post failure analysis)	35
Los Angeles (USA)	155	E	8.0+	40	>78	0.50	Design earthquakes developed by USGS	8
Los Angeles (USA)	155	E	7.5+	near site	>34	1.19		
Los Angeles (USA)	155	E	6.4	near site	>13	0.50		
Lower Van Norman (USA)	140	HF	6.5	near site	15	0.60	Modified Pacoima record (1971-02-09)	36
Lower Van Norman (USA)	140	HF	8.25	40	70	0.40	Synthetic earthquake	36
Lower Van Norman (USA)	140	HF	7.5	40	40	0.25	Synthetic earthquake	36
Lower Van Norman (USA)	140	HF	7.0	40	25	0.20	Taft record (1952-07-21) (post failure analysis)	36
Upper San Leandro (USA)	190	HF	8.3	37	70	0.42	Synthetic earthquake	21
Upper San Leandro (USA)	190	HF	7.0	5	20	0.40	Lake Hughes record (1971-02-09)	21
Upper San Leandro (USA)	190	HF	5.5	5	6	0.20	Golden Gate record (1957) (reanalysis)	21
Chabot Lake (USA)	135	E	8.3	30	75	0.40	Synthetic rock motion	36
Amaluza (Ecuador)	554	CA	8.0	75	24	0.30	El Centro record (1940-05-18)	23
Amaluza (Ecuador)	554	CA	7.0	20	24	0.20	El Centro record (1940-05-18)	23

Tableau 3: Besoins de l'analyse

Dam Type	Seismicity (UBC Zoning)		
	Low (Zone 1)	Moderate (Zone 2)	High (Zones 3 & 4)
Earth	DBE	DBE	OBE, DBE
Rockfill	DBE	DBE	OBE, DBE
Concrete Arch	DBE, RIE	DBE, RIE	OBE, DBE, RIE
Concrete Gravity, Buttress	DBE, RIE	DBE, RIE	OBE, DBE, RIE
Composite	DBE	DBE	OBE, DBE

Tableau 4: Critères d'analyse sismique des centrales nucléaires et des barrages (proposés)

Item	Nuclear Plants	Dams
<u>Regulatory Requirements</u>	<ul style="list-style-type: none"> Review by NRC Regulatory Guides 1.29, 1.60, 1.61, 1.92 Standard Review Plan Sections 2.4.4, 2.5.2, 2.5.4, 3.7.1, 3.7.2, 3.7.3 	<ul style="list-style-type: none"> Review by boards of consultants and/or state agencies
<u>Design Earthquakes (Definition)</u>	<ul style="list-style-type: none"> OBE (probabilistic OK) SSE (deterministic) 	<ul style="list-style-type: none"> OBE (probabilistic) DBE (probabilistic and deterministic) RIE (probabilistic and deterministic)
<u>Specific Requirements for Design Earthquakes</u>	<ul style="list-style-type: none"> OBE \geq 1/2 SSE Peak Vert. Acc. = 2/3 Peak Hor. Acc. 3 components of motion OBE, SSE required for all plants 	<ul style="list-style-type: none"> DBE \geq 2 OBE RIE \geq 1.5 OBE & 0.50 g Peak Vert. Acc. = 2/3 Peak Hor. Acc. (OBE, DBE) Peak Vert. Acc. = Peak Hor. Acc. (RIE) 2 or 3 components of motion OBE, RIE may not be required for some dams
<u>Spectral Requirements</u>	<ul style="list-style-type: none"> Site-independent specified horizontal & vertical spectra (limited exceptions for critical sites) Vertical spectra scaled to peak horizontal acceleration Spectra-matching requirements for 5 damping values (0.5, 2, 5, 7, & 10%) Spectra computed at a minimum of 75 points between 0.03 s and 5 s No more than 5 computed points below specified spectra Maximum deviation = 10% 	<ul style="list-style-type: none"> Site-dependent specified horizontal & vertical spectra Vertical spectra scaled to peak vertical acceleration Spectra-matching requirements for 1 damping value (5%) Spectra computed at a minimum of 45 points between 0.01 s and 10 s No more than 5 computed points below specified spectra Maximum deviation = 10%

Tableau 5: Processus de sélection des pointes d'accélération

Definition	Condition	Acceleration (g)
OBE Probabilistic <u>OBE</u>	50% probability, 100 years	0.16 <u>0.16</u>
<u>Owens Valley Fault Maximum Event</u> Magnitude 8.3, Depth 8 km (60 km away)	<ul style="list-style-type: none"> ● Esteva's attenuation (1973) ● Schnabel-Seed's attenuation (1973) ● McGuire's attenuation (1976) ● Donovan's attenuation (1976) 	0.40 0.22 0.30 0.30
DBE (a) Deterministic DBE (b) Probabilistic DBE (c) Empirical <u>DBE</u>	<ul style="list-style-type: none"> ● Average of 4 above ● 95% probability, 100 years ● 2 times the OBE 	0.31 0.36 0.32 <u>0.36</u>
RIE* (a) Probabilistic RIE* (b) Empirical RIE* (c) Empirical <u>RIE*</u>	<ul style="list-style-type: none"> ● 75% probability, 100 years ● 1.5 times the OBE ● Minimum peak acceleration 	0.22 0.24 0.50 <u>0.50*</u>

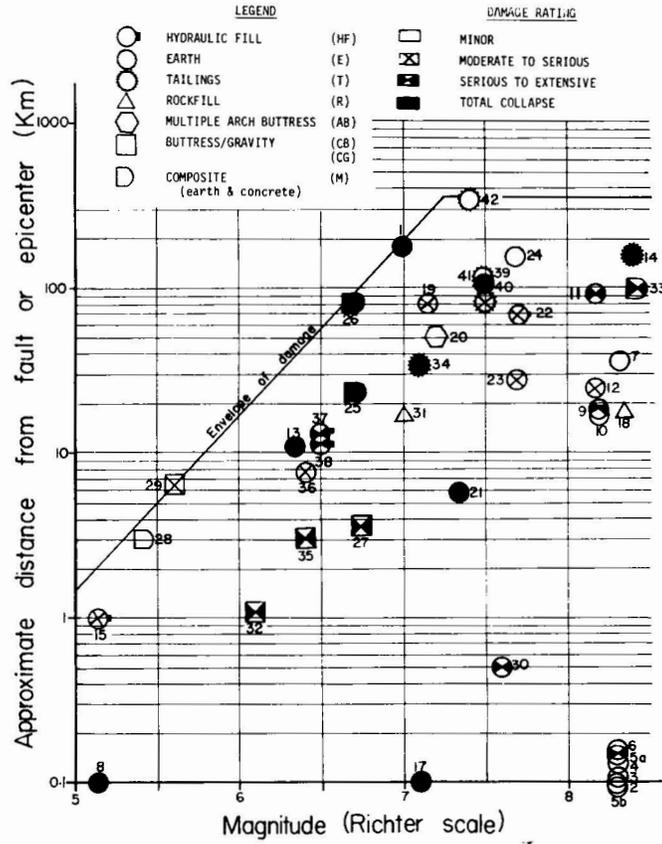


Figure 1: Barrages endommagés par des séismes

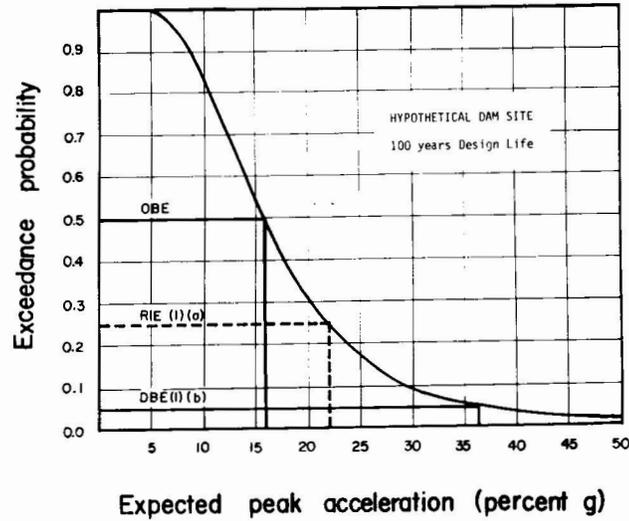


Figure 2: Probabilités d'excéder les pointes d'accélération

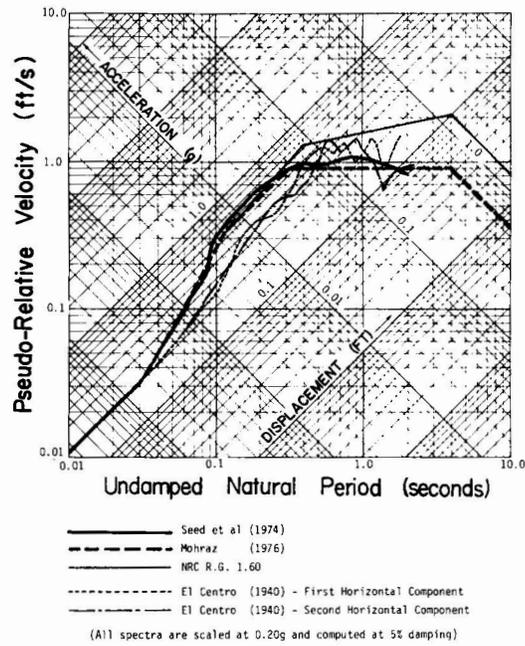


Figure 3: Spectres MSD horizontaux (rocher)

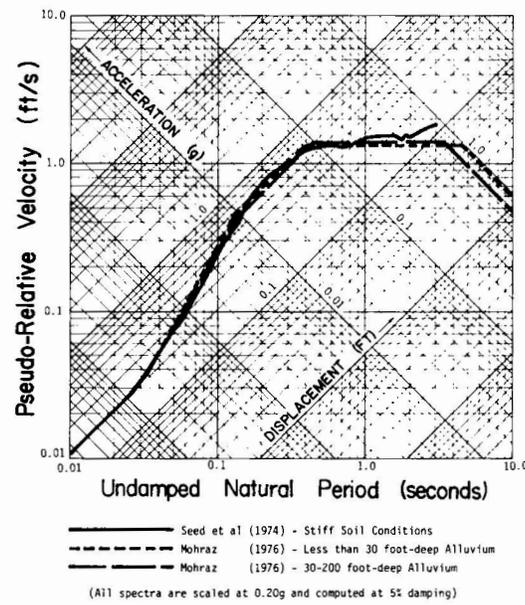


Figure 4: Spectres MSD horizontaux (sols)

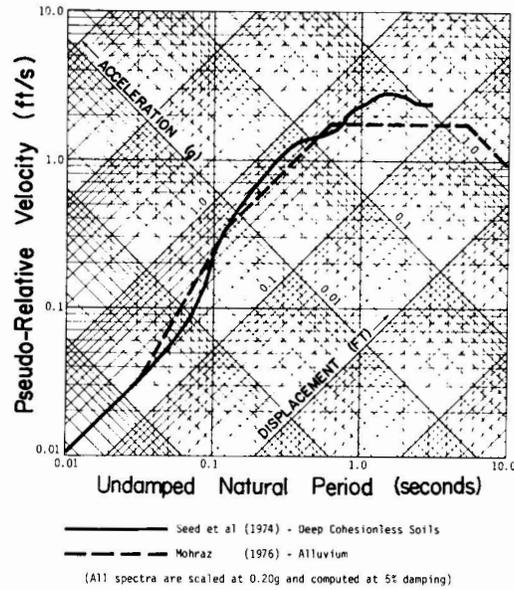


Figure 5: Spectres MSD horizontaux (sols profonds)

Note: Relationships shown above 0.30g are based on extrapolated data base

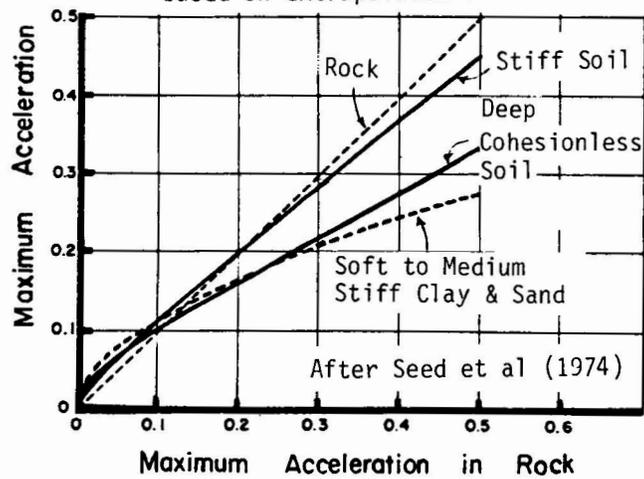


Figure 6: Relation entre les pointes d'accélération au rocher et pour d'autres conditions (d'après Seed et al)

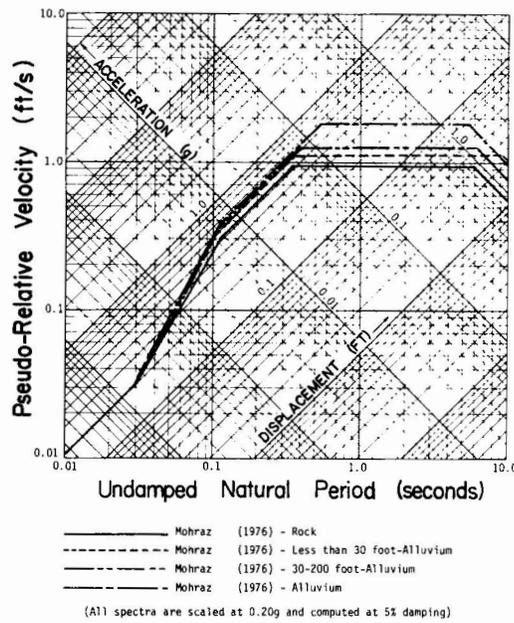


Figure 7: Spectres MSD verticaux

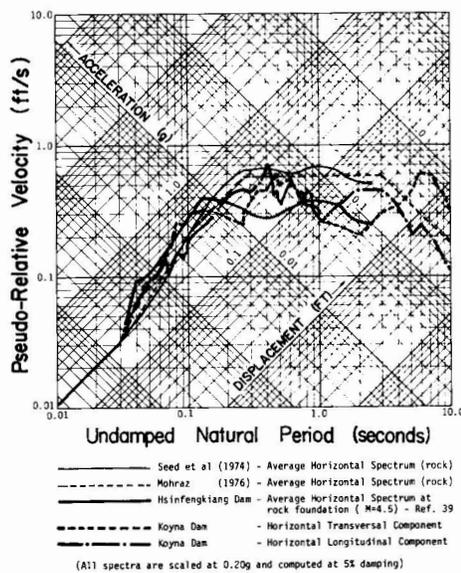


Figure 8: Spectres des sêismes d'Hsinfengkiang et de Koyna

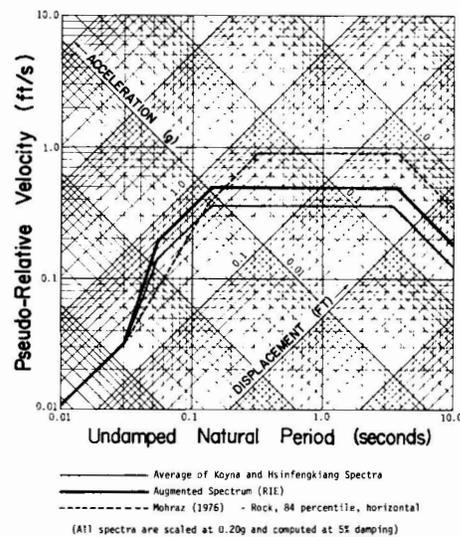
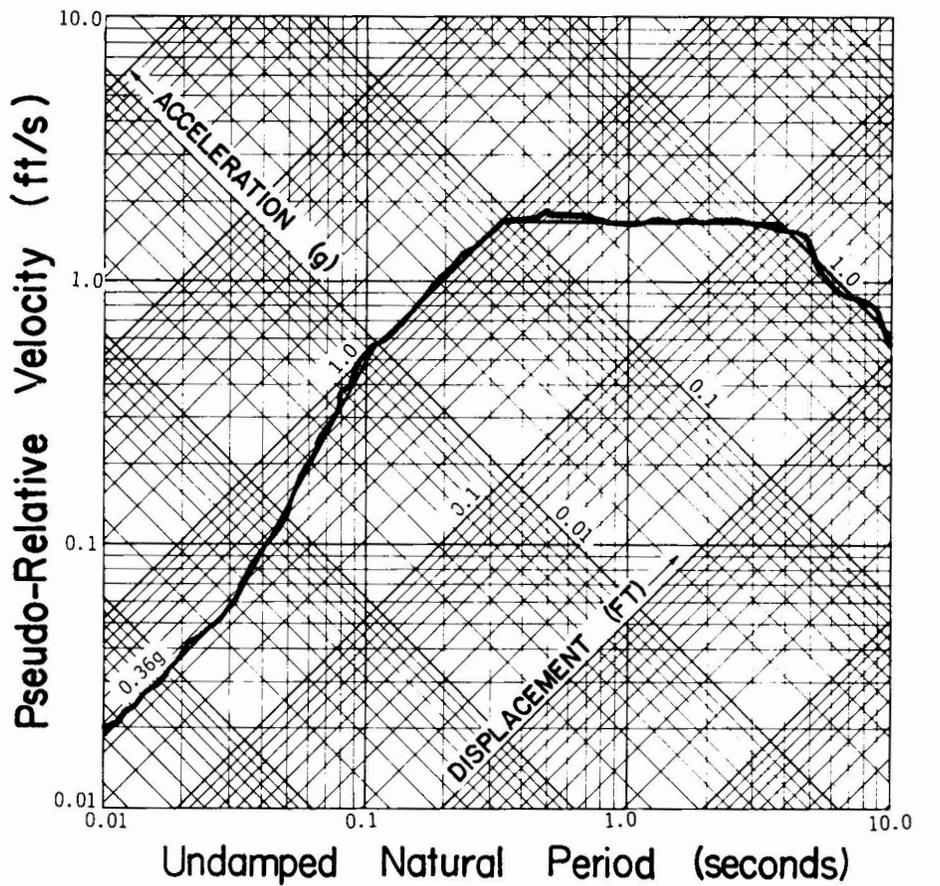


Figure 9: Spectre relevê (Sêisme Induit)



————— Target Spectrum (Mohraz, Rock Sites, 84 percentile)
 ————— Design Basis Earthquake (DBE) - First Horizontal Component
 (All spectra are scaled at 0.20g and computed at 5% damping)

Figure 10(a): Séisme Majoré; 1ère composante horizontale

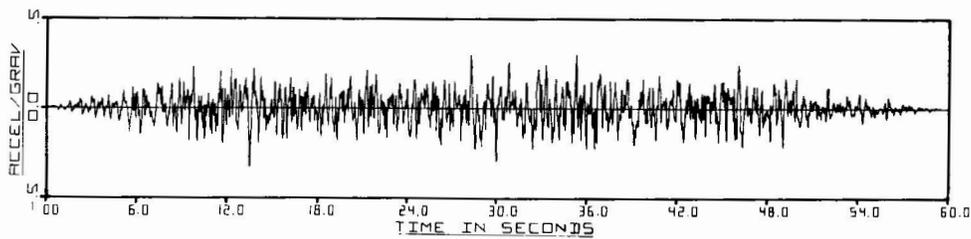


Figure 10(b): Séisme Majoré; 1ère composante horizontale