

Original Paper

Evaluation de l'aléa sismique du barrage d'Avène (Hérault – France) / Assessment of seismic hazards for Avène Dam, Hérault, France

Corrine Lacave (✉) · Bernard Couturier (✉)

C. Lacave

Résonance Ingénieurs-Conseils SA, 21 rue Jacques Grosselin, 1227 Carouge, Suisse

B. Couturier

BRL Ingénierie et École nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble, Laboratoire 3S, BP 53, France

✉ C. Lacave

Phone: +41-22-3010253

Fax: +41-22-3010270

E-mail: corinne.lacave@resonance.ch

✉ B. Couturier

Fax: +33-476-877000

E-mail: Bernard.Couturier@brl.fr

Received: 28 April 2003 / **Accepted:** 24 February 2004

Résumé Cet exemple du barrage d'Avène dans le département de l'Hérault (France) concerne la caractérisation de l'aléa sismique pour un ouvrage de type voûte mince de 61 m de hauteur achevé en 1961 et reposant sur des fondations en quartzites très rigides en bancs verticaux.

Après définition des zones sismo-tectoniques, on s'appuie sur celles du séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV), puis du séisme majoré de sécurité (SMS). Le calcul des spectres de réponse a été fait à partir de 8 lois d'atténuation spectrales moyennées à partir de leur importance (la loi d'Ambraseys et al, 1996, est prépondérante).

Cette étude réalisée en 1999 se base sur l'utilisation d'un spectre de dimensionnement pour contrôler *sommairement* le barrage et doit être considérée comme telle. Tout contrôle détaillé

nécessiterait de procéder à des calculs à partir de signaux temporels et prenant en compte la durée de l'événement.

Abstract The Avène Dam in the department of France Hérault illustrates how seismic hazards were characterized for a thin arch dam, 61m high, completed in 1961, and built on a very rigid quartzitic sandstone foundation forming vertical layers. After defining the seismotectonic zoning, the assessment is based on the Maximum Historically Probable Earthquake (SMHV), then on the Safe Maximum Earthquake (SMS).

Traditional methods have been updated thanks to state of the art systems. Using seismotectonic information and available historical and instrumental earthquake data, earthquake magnitude and depth values can be allocated to the retained SMHV. The SMS is then obtained by adding half a degree to the SMHV, which can be considered to represent an additional degree in intensity. Earth movements on the site studied are then directly characterized in response spectrums based on spectral attenuation laws and the retained SMS values. The local SMS is often decisive at high frequencies, the distant earthquake at low frequencies, if either one or the other is not predominant throughout the whole frequency range of interest.

The earthquake hazard for Avène Dam is therefore as follows. For the nearby earthquake (SMS), the reference is the event of 16 May 1939, with an intensity of VI at the epicentre, a depth of 15 km, and a magnitude of 4.9. The SMS of the same earthquake on the Avène Dam site (1 km away) is considered to be 5.4. The distant earthquake taken into account (SMS intensity = VII – VIII) must be one that would affect the furthest part of the zone nearest to Avène, i.e. approximately 50 km away. Considering the (extremely blurred) relation between epicentral intensity I_0 and magnitude M , (h = depth in km), $M=0.55 I_0 + \log h + 0.35$, the approximate magnitude of this earthquake is 5.6. The response spectrums were calculated using 8 spectral attenuation laws.

These laws, except for those of Dahle et al. and Petrovski, applicable to all sites in general, enable the ground type (rock in this case) to be defined. In order not to increase the safety margin unduly by cumulating margins, the mean values obtained for each law were retained. Lastly, the spectral accelerations obtained with the different laws were averaged. Considering that the law of Ambraseys et al. is the most recent and is based on the greatest number of data from Europe and the Middle East, it was weighted by 3 in these calculations. All the other laws were weighted by 1.

The nearby earthquake magnitude is thus 5.4 at a distance of 1 km and a depth of 15 km. Figure 5 shows the spectral accelerations obtained with the above-mentioned attenuation laws. They are

elastic spectrums at 5% damping. It can be seen that there is a high amount of variation in the results, which is typical, especially for the near field. There are two reasons for this variation. First, some laws take the distance from the epicentre into account (here 1 km) while others are based on the hypocentre (here, 15 km). Second, the variability of the accelerations in the near field is high (for the same magnitudes and distances), and the attenuation laws are based on a limited number of data for the near field, hence greater uncertainty concerning short epicentral distances. For the distant earthquake (SMS = VII-VIII, distance 50 km), the magnitude retained was 5.6 at a distance of 50 km from Avène Dam and to a depth of 13 km. This study was carried out in 1999 using a calibration spectrum to *briefly* check the dam and it is important to remember this. For more precise inspection, it would be necessary to perform calculations based on temporal signals taking into account the duration of the event.

Mots clés: Barrage · Séisme · Lois d'atténuation · Spectres de réponse

Keywords: Dams · Seism · Earthquake · Attenuation laws · Response spectrum

Introduction

L'exemple décrit ici s'inscrit dans le cadre de la mise à jour du Plan Particulier d'Intervention, en application du décret 92-997 du 15 septembre 1992, pour le cas du barrage d'*Avène* afin de définir l'aléa sismique le concernant (voir figure 1). Celui-ci est situé dans la haute vallée de l'*Orb* à 25 km au Nord de *Bédarieux*. Il constitue l'une des pièces maîtresses de l'aménagement hydraulique du département de l'*Hérault*, avec une possibilité de stockage de 34,3 hm³.



Fig. 1 : Barrage d'Avène – Avène Dam

Cette retenue, destinée principalement à l'irrigation, est sollicitée aujourd'hui pour satisfaire des besoins multiples tels que production d'électricité, d'eau potable, éventuellement soutien d'étiage, etc. Les principales caractéristiques du barrage, mis en service en 1962, sont résumées dans le tableau1 (Cheylan, 1965)

[Tableau 1 will appear here. See end of document.]

Objectif de l'étude

L'objectif est de définir l'aléa sismique au site du barrage d'Avène afin de permettre une appréciation générale de son comportement sismique. Selon le zonage sismique de la France en vigueur (Despeyroux, Godefroy, 1986), ce site se trouve en zone 0, de sismicité dite "négligeable" pour les risques "normaux". Il faut cependant tenir compte de l'aléa sismique pour les risques "spéciaux", même en zone 0.

Méthodologie

La méthodologie mise en oeuvre est une variante modernisée de l'approche pragmatique, dite classique, qui est, dans son principe, appliquée à tous les cas d'installations à risque "spécial" (installations nucléaires, barrages, installations chimiques classées) en France (Faure, Ferrieux, Levret, Mohammadioun, 1982). Elle se base en premier lieu sur la sismicité historique. Dans un premier temps, il convient de définir des zones ou provinces sismo—tectoniques supposées "homogènes" du point de vue de leur sismicité. Cette définition doit tenir compte des données géologiques (cadre tectonique, contexte géodynamique actuel) et sismiques (sismicité historique et instrumentale). L'aléa calculé pour un site donné dépendra fortement des résultats de cette étape.

Dans un deuxième temps, le "séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV)" est défini de la façon suivante (voir figure2):

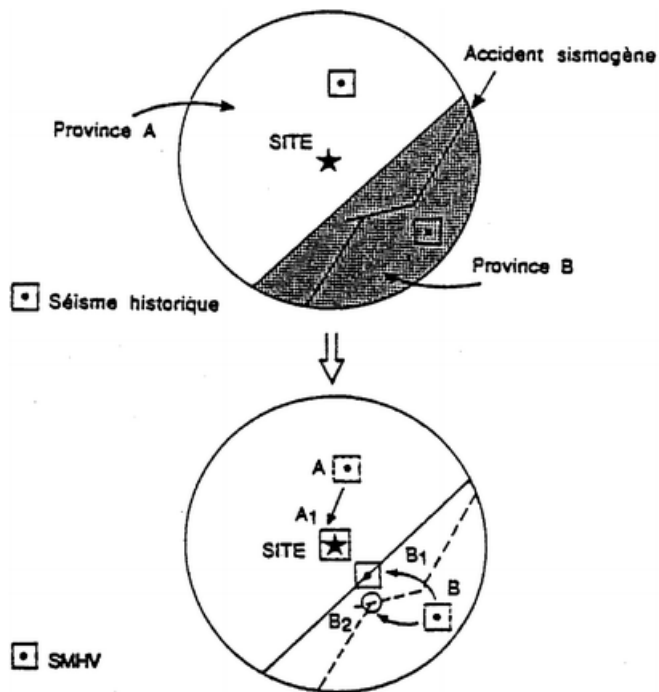


Fig. 2 : Illustration de la définition du SMHV à partir de la connaissance des plus grands séismes historiques (d'après Faure, Ferrieux, Levret, Mohammadioun., 1982)

- D'une part, dans la zone sismo—tectonique à laquelle appartient le site, le séisme maximal connu est considéré comme pouvant se produire sous le site même, sauf si l'on peut justifier sa liaison avec un accident sismogène précis. L'intensité du SMHV sur le site est alors égale à l'intensité épicentrale du séisme ainsi déplacé.
- D'autre part, dans un domaine voisin ou sur un accident sismogène, on considère le séisme maximal comme pouvant se produire au point du domaine ou de l'accident le plus proche du site ; l'intensité du SMHV sur le site en question sera calculée compte tenu de la distance fictive ainsi déterminée.

Les SMHV qui provoquent les effets les plus importants sur le site en question sont déterminants. En règle générale, il y a lieu de retenir deux SMHV, un local (à la verticale du site ou sur une faille active très proche) et un lointain (un SMHV plus violent, mais plus éloigné du site). Finalement, afin d'obtenir les "séismes majorés de sécurité" (SMS), les SMHV sont majorés d'un degré sur l'échelle d'intensité pour autant que cette majoration semble compatible avec le contexte sismo—tectonique en question.

L'approche classique travaille donc d'abord en intensité et définit ensuite, basée sur celle-ci ainsi que les caractéristiques géotectoniques du site, un spectre de réponse forfaitaire. C'est en effet un spectre de réponse qui est utilisé comme base de calcul par les ingénieurs de structures.

L'état de l'art actuel permet une modernisation du procédé classique. Sur la base des connaissances sismo—tectoniques et des données disponibles sur les sismicités historique et instrumentale, des valeurs de magnitude et de profondeur peuvent être attribuées aux SMHV retenus. On passe du SMHV au SMS en majorant la magnitude d'un demi-degré, ce qui peut être considéré comme équivalent à la majoration d'un degré en intensité. Les mouvements du sol au site en question sont ensuite caractérisés directement par des spectres de réponse calculés à partir de lois d'atténuation spectrales et des SMS retenus. C'est souvent le SMS local qui est déterminant en hautes fréquences, et le séisme lointain en basses fréquences, si ce n'est pas l'un des deux qui domine dans toute la gamme des fréquences d'intérêts.

Il faut néanmoins souligner que cette majoration n'est pas spécifiquement demandée par le Comité Technique Permanent des Barrages auquel sont soumis les PPI. En France certains barrages ont été contrôlés en prenant le SMHV seul comme séisme de référence.

Détermination des mouvements du sol

Cadre sismotectonique

D'après la carte des unités sismo—tectoniques de la France métropolitaine (Bles, Bour, Dominique, Godefroy, Martin, Terrier, 1998), dont un extrait est donné sur la figure 3, le barrage d'Avène se trouve dans le domaine sismotectonique D12 : "Domaine Sud du Massif Central". Le séisme de référence caractérisant cette unité est celui du 16 mai 1939, d'intensité épiscopale VI, de profondeur 15 km, et de magnitude 4.9. Cette unité est caractérisée par une déformation de type normale-décrochante.

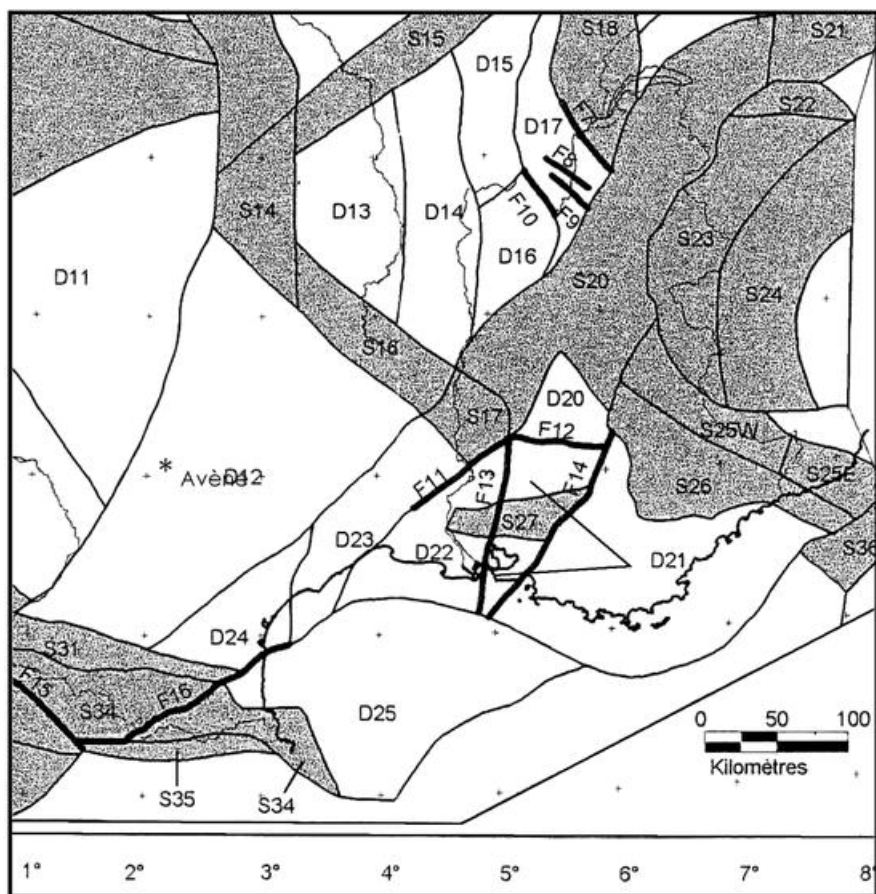


Fig. 3 : Extrait de la carte des unités sismo—tectoniques de la France Métropolitaine (d’après Bles, Bour, Dominique, Godefroy, Martin, Terrier, 1998)

En ce qui concerne le séisme lointain, c’est l’unité sismo-tectonique D24 : “Bas-Languedoc occidental” qui est déterminante. Elle est caractérisée par le séisme de référence du 28 juin 1950, d’intensité épiscopale VI-VII, de profondeur 13 km et de magnitude 5.0. La figure 4 montre un extrait de la sismicité historique dans la région considérée (source : catalogue SIRENE).

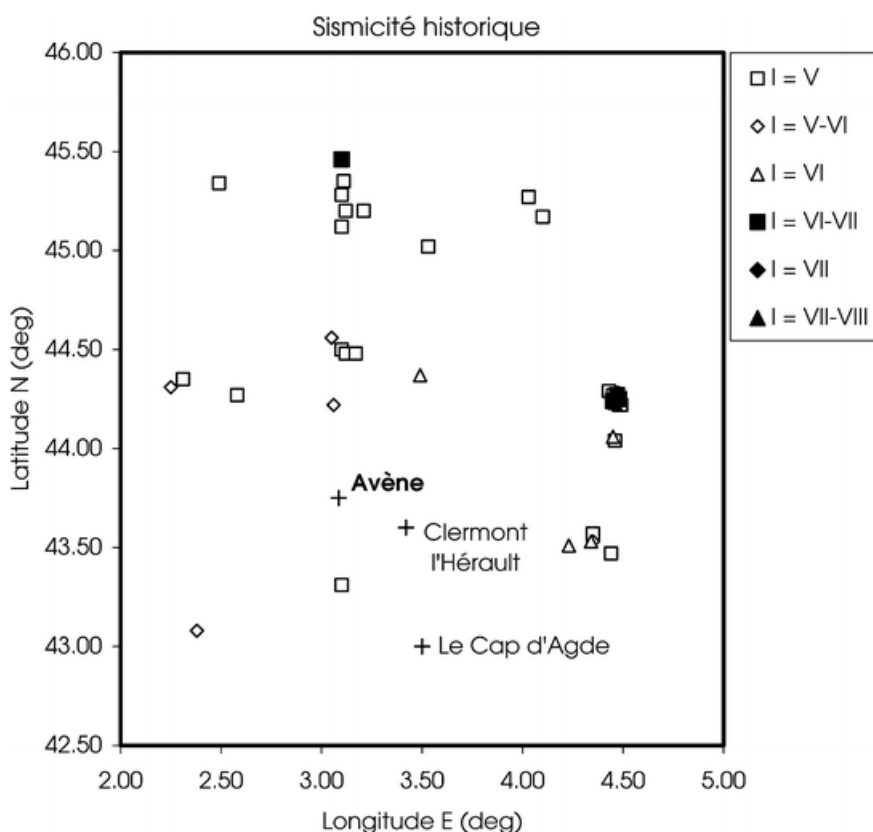


Fig. 4 : Sismicité historique (source : SIRENE) dans la région du barrage d'Avène ; les séismes d'intensité supérieure à VI ne sont pas localisés dans l'unité sismo—tectonique D12

Détermination des SMHV et SMS

Selon la carte établie dans le cadre du Zonage Sismique de la France Métropolitaine pour l'application des Règles Parasismiques aux Installations Classées (BRGM, 1998), le site d'Avène est classé comme suit:

Séisme proche (SMS: Séisme Majoré de Sécurité): Le séisme de référence caractérisant l'unité D12 est celui du 16 mai 1939, d'intensité épicentrale VI, de profondeur 15 km, et de magnitude 4.9. Il sera considéré comme se produisant au site du barrage d'Avène (distance 1 km), avec une magnitude SMS de 5.4.

Séisme lointain : Le séisme lointain à prendre en compte pour le site du barrage d'Avène (intensité $SMS = VII - VIII$) doit être considéré comme pouvant se produire en limite de la zone D24 la plus proche d'Avène, c'est à dire à une distance approximative de 50 km. Compte tenu de la relation – très floue – entre intensité épicentrale I_0 et magnitude M (h : profondeur en km), $M = 0.55 I_0 + \log h + 0.35$ (Karnik, 1969), la magnitude approximative de ce séisme est de 5.6.

Calcul des spectres de réponse

Des spectres de réponse en accélération ont été calculés à l'aide des lois d'atténuation spectrales suivantes dans le tableau 2. Ces lois permettent de préciser la nature du sol ("roche" en l'occurrence) – à l'exception des lois de Dahle et al. et de Petrovski, valables pour tous sites confondus. Afin de ne pas cumuler les marges de sécurité, les valeurs moyennes ont été retenues pour chaque loi appliquée.

[Tableau 2 will appear here. See end of document.]

Les accélérations spectrales obtenues par les différentes lois ont finalement été moyennées. Etant donné que la loi d'Ambraseys (Ambrasey N.N., Simpson K.A., Bommer J.J., 1996), est la plus récente, basée sur le plus grand nombre de données d'Europe et du Moyen Orient, un poids de 3 lui a été attribué lors du calcul de la moyenne ; un poids de 1 a été utilisé pour toutes les autres lois. Le séisme proche est un séisme de magnitude 5.4, à une distance de 1 km, et à une profondeur de 15 km. La figure 5 montre les accélérations spectrales issues des lois d'atténuation mentionnées ci-dessus. Il s'agit de spectres élastiques pour 5% d'amortissement. Une large variation parmi les résultats est visible, ce qui est typique tout particulièrement pour le champ proche. Cette variation s'explique par deux raisons. D'une part, certaines lois prennent en considération la distance épicerentre (ici 1 km) tandis que d'autres se basent sur la distance hypocentrale (ici 15 km). D'autre part, on observe une grande variabilité d'accélération en champ proche (à magnitude et distance égale), et le nombre de données en champ proche sur lesquelles se basent les lois d'atténuation est toujours très limité, d'où une incertitude accrue pour les faibles distances épicercentrales.

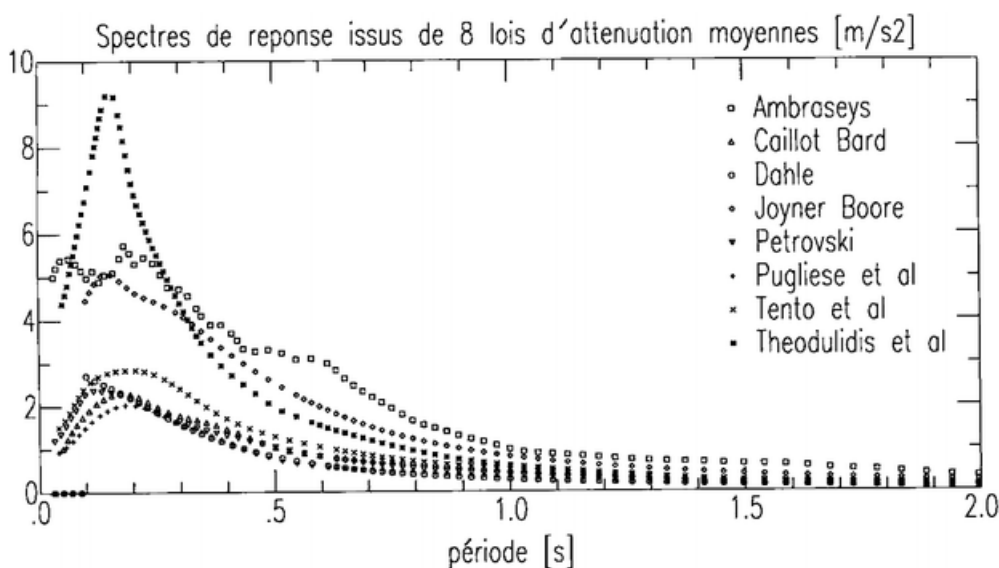


Fig. 5 : Accélérations spectrales (amortissement : 5%) pour le SMS local, en fonction de la période T

Pour le séisme lointain (SMS I = VII-VIII, distance 50 km), un séisme de magnitude 5.6 à une distance de 50 km du barrage d'Avène, et à une profondeur de 13 km, a été retenu. Etant donné les très faibles accélérations obtenues, en comparaison avec le séisme proche, les résultats du séisme lointain ne sont pas reportés sur les figures ci-dessus.

La moyenne des accélérations spectrales pour le séisme proche, ainsi que le spectre élastique proposé sont présentés sur la figure 6. En comparaison, la figure 6 montre aussi le spectre des recommandations AFPS 1990 pour un site rocheux (dénommé type S0), avec une accélération dite nominale de 1.5 m/s^2 . Le spectre élastique proposé, en m/s^2 , est défini par les équations suivantes (T : période propre) :

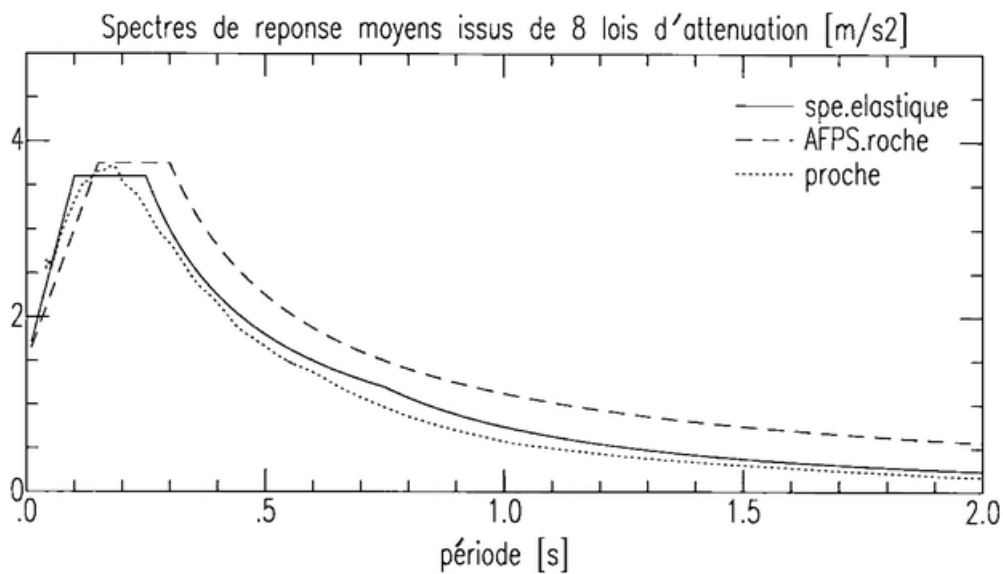


Fig. 6 : Accélérations spectrales moyennes (trait pointillé) et spectre élastique de dimensionnement proposé pour le SMS local (trait plein) (amortissement : 5%). La courbe en tirets correspond à la forme spectrale normalisée de l'AFPS, pour comparaison

$$T < 0.1 \text{ s} \quad S_a = 1.5 + 21 * T$$

$$0.1 \text{ s} < T < 0.25 \text{ s} \quad S_a = 3.6$$

$$0.25 \text{ s} < T < 0.75 \text{ s} \quad S_a = 0.9 / T$$

$$T > 0.75 \text{ s} \quad S_a = 0.743 / (T)^{5/3}$$

Les accélérations spectrales faibles, à longue période, par rapport à la forme spectrale normalisée de l'AFPS, s'expliquent par le fait qu'ici, le séisme local détermine entièrement l'aléa sismique, tandis que la forme spectrale de l'AFPS tient compte de la contribution de séismes locaux et lointains.

Conclusion

Étant donné que le SMS lointain donne lieu à des accélérations spectrales très faibles par rapport au séisme local, il suffit de considérer un seul séisme de dimensionnement – le SMS local, d'une magnitude de 5.4. Le spectre de réponse qui en résulte est représenté sur la figure 6; l'intensité SMS correspondante sur le site est de $I = VII$. Le spectre élastique proposé est caractérisé par un plateau relativement haute fréquence, à 3.6 m/s^2 , tandis que son contenu basse fréquence est relativement faible.

La présente étude, réalisée en 1999, se base uniquement sur l'utilisation d'un spectre de dimensionnement, pour un contrôle sommaire du barrage. Dans le cas d'un contrôle détaillé du comportement sismique il est recommandé de procéder à des calculs à partir de signaux temporels. Ceci a, entre autres, l'avantage de prendre en compte également la durée de l'événement. Pour se faire, il est donc nécessaire de fournir des signaux temporels. Deux variantes sont possibles pour cela:

- Créer des sismogrammes synthétiques suivant le spectre de dimensionnement proposé. Cette méthode a le désavantage de produire des signaux irréalistes du point de vue contenu fréquentiel, car un seul séisme réel ne couvre, en général, pas la totalité du spectre de dimensionnement.
- La méthode qui est donc de plus en plus fréquemment adoptée consiste à rechercher des enregistrements réels de séismes, dans les bases de données appropriées. Il convient, dans ce cas, de trouver plusieurs enregistrements, couvrant chacun une portion du spectre de dimensionnement, afin qu'ensemble ils couvrent toute la gamme de fréquences considérée. Typiquement, 3 à 5 enregistrements sont nécessaires.

Bibliographie

- AFPS (1990) Recommandations AFPS 90, tome 1, Presses Ponts et Chaussées, Paris
- Ambrasey NN, Simpson KA, Bommer JJ (1996) Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 371–400
- Bles JL, Bour M, Dominique P, Godefroy P, Martin C, Terrier M (1998) Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées, Documents du BRGM 279
- Cheyran G (1965) Les études géologiques des aménagements hydrauliques de la Compagnie d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc – Mémoire de l'Université de Grenoble, p 343
- Dahle A, Bungum H, Kvamme LB (1990) Attenuation Models Inferred from Intraplate Earthquake Recordings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, 1125–1141
- Despeyroux J, Godefroy P (1986) pour la Délégation aux Risques Majeurs, Nouveau Zonage Sismique de la France (1985), La Documentation Française

Faure J, Ferrieux H, Levret A, Mohammadioun B (1982) L'évaluation du risque sismique pour la sécurité des installations nucléaires, Séminaire AIEA, Vienne

Karnik V (1971) Seismicity of the European area, R. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, Part 1 (1969) and Part 2

Petrovski D (1986) Probabilistic approach for evaluation of seismic design parameters, earthquake ground motion and antiseismic evaluation of nuclear power plants, Proc. of AIEA Technical Committee

Tableau 1 Caractéristiques du barrage

➤	Superficie du bassin versant :	12 500 ha
➤	Apports moyens annuels :	110 hm ³
➤	Crue maximale :	1 100 m ³ /s
➤	Aire de la retenue :	195 ha
➤	Capacité de la retenue :	34,3 hm ³
➤	Terrains :	Quartzites et schistes quartzeux [14]
➤	Tectonique :	Faïlle principale en thalweg, dans le sens de la vallée
➤	Consolidation du terrain par injections :	Versant rive droite
➤	Étanchéité :	Voile d'injection de 11 000 m ² .
➤	Drainage :	Fondation et substratum avec 87 drains.
➤	Piezométrie :	Fondation et substratum avec 20 piézomètres.
➤	Type d'ouvrage :	Voûte mince de 105 m de rayon (Photo 1)
➤	Hauteur maximum au-dessus de la fondation :	61,75 m
➤	Épaisseur à la clef au couronnement :	2,60 m
➤	Longueur en crête (culées comprises) :	240 m
➤	Volume de béton voûte	50 000 m ³
➤	Évacuateur de crues :	975 m ³ /s

Tableau 2 Lois d'atténuation

Référence	Gamme de magnitude	Gamme de distance [km]
Ambraseys, Simpson et Bommer (1996) [5]	4.0 – 7.5	<200
Caillot et Bard (1993) [6]	3.2 – 6.8	<60
Dahle, Bungum et Kvamme (1990) [7]	2.9 – 7.8	6–1300
Joynes et Boore (1988) [8]	5.0–7.5	0.5–400
Petrovski (1986) [9]	---	---
Pugliese et Sabetta (1989) [10]	4.6 – 6.8	1.5–200
Tento, Franceschina et Marcellini (1992) [11]	4.0 – 6.6	3–170
Theodulidis et Papazachos (1992) [12]	4.5 – 7.0	1–130