

Analyse de risque proportionnée des barrages vis-à-vis du séisme en France métropolitaine, zone faiblement à modérément sismique – Valorisation du retour d'expérience

Proportionate risk analysis of dams against earthquakes in Metropolitan France, a low to moderately seismic zone - Valorization of experience feedback

Nicolas Humbert, Philippe Kolmayer, Frederic Laugier
EDF-CIH - 4, allée du Lac de Tignes, 73290 La Motte Servolex, France
nicolas.humbert@edf.fr ; philippe.kolmayer@edf.fr; frederic.laugier@edf.fr

MOTS CLEFS

Étude de danger, séisme, barrages, retour d'expérience

KEY WORDS

SaRRA, dam safety review, dam risk analysis, earthquake, feedback, lessons learnt

RÉSUMÉ

Le retour d'expérience mondiale montre la faible sensibilité générale des barrages vis-à-vis du risque sismique. Dans le cadre des analyses de risque des études de danger, l'objectif de cet article est de proposer une approche proportionnée et raisonnée vis-à-vis de ce risque pour la France métropolitaine, territoire faiblement à modérément sismique au regard d'autres zones du globe. La première partie de l'article présente un retour d'expérience de deux séismes récents en 2023 et 2024 et d'intensité extrême en Turquie et au Japon. Au-delà de ces deux exemples, une analyse plus générique du retour d'expérience est donnée. Il en ressort que les efforts consacrés au risque sismique, par comparaison aux autres risques affectant les barrages, semblent excessif, en particulier dans une zone comme la France métropolitaine, faiblement à modérément sismique. Dans ces conditions, une approche proportionnée de l'analyse du risque sismique est proposée, dans le cadre de l'exercice des EDD, à la fois pour les barrages en remblais, et les barrages en béton. Le cas des matériels hydromécaniques (vannes) est également évoqué.

ABSTRACT

Worldwide experience shows that dams are generally not very sensitive to seismic risk. In the context of Safety Review Risk Analysis (SaRRA) in France, the aim of this article is to propose a proportionate and reasonable approach to this risk for metropolitan France, a territory with low to moderate seismic activity compared to other parts of the world. The first part of the article presents feedback from two recent earthquakes in 2023 and 2024, of extreme intensity, in Turkey and Japan. Beyond these two examples, a more generic analysis of feedback is given. It shows that the efforts devoted to seismic risk, compared with other risks affecting dams, appear to be over-dimensioned, particularly in an area such as mainland France, which has a low to moderate level of seismic activity. Under these conditions, a proportionate approach to seismic risk analysis is proposed for both embankment and concrete dams, as part of the SaRRA exercise. The case of hydromechanical equipment (gates) is also discussed.

1. INTRODUCTION

Les séismes sont à l'origine de catastrophes naturelles désastreuses dont les bilans s'élèvent régulièrement à plusieurs dizaines de milliers de victimes dans des pays à forte sismicité. Ces pays ont donc en général produit des réglementations pour limiter la sensibilité des infrastructures aux séismes.

L'objectif du présent article est de présenter la situation particulière des barrages « hydrauliques » vis-à-vis du séisme qui ont montré une robustesse avérée (les barrages de stériles miniers présentent une sensibilité avérée au séisme, et sont exclus du périmètre de cet article).

Dans un premier temps, le retour d'expérience de deux séismes extrêmes récents (Turquie 2023 et Japon 2024) est présenté avec un élargissement plus global aux autres séismes en général. Dans un second temps, la perception particulière du risque sismique par les populations et les législateurs sera également évoquée, perception qui amène à consacrer des ressources d'ingénierie et d'investissement pour le risque sismique qui semblent en décalage par rapport aux autres risques auxquels les barrages sont soumis.

Dans un troisième temps, une approche proportionnée au risque et raisonnée sera présentée dans le cadre de la réalisation des études de danger en France. Avant de conclure, le cas particulier des organes hydromécaniques sera brièvement évoqué.

2. RETOUR D'EXPERIENCE INTERNATIONAL

2.1. Retour international et valorisation en France

2.1.1. Retour mondial

Pays	Nom du barrage	Année de construction	Type d'ouvrage	Hauteur (m)	Année de la rupture	Référence
USA	AUSTRIAN DAM (Lake Elsmar)	1950	TE	56.4	1989	[14]
Taiwan	SHIH KANG	1997	PG	25	1999	[12]
Japan	FUJINUMA-IKE	1949	TE	18.5	2011	[11]

Figure 1 - Liste des barrages ayant rompu au séisme avec lâcher d'eau incontrôlé selon l'ICOLD [19]

Le bulletin 188 de la CIGB, mise à jour en 2019 du bulletin 99 [19], identifie trois ruptures de barrage avec lâcher d'eau à la suite d'un séisme. Elles sont tracées dans le tableau ci-dessus.

La base de données se limite aux grands barrages : par exemple le cas du barrage de Sheffield rompu en 1925 suite à des phénomènes de liquéfaction [3], n'est pas tracé car l'ouvrage mesure 10 m de haut.

Ces 3 grands barrages ayant mené à un lâcher d'eau non maîtrisé à la suite d'un séisme sont tous localisés à proximité de failles sismiques actives et identifiées, au niveau de la ceinture de feu, une zone de sismicité majeure et bien connue.

On note que le bulletin 188 n'identifie pas la rupture uniquement lors d'un lâcher incontrôlé d'eau, mais aussi en cas de dégradation importante de sa structure, le rendant incapable de retenir l'eau suite au séisme. 6 barrages remblais sont cités : les barrages Tappar et Chang (Inde) en 2001, les barrages de Doue et Baihe/Paiho (Chine) en 1976, le barrage de Lliu-Lliu (Chili) en 1985 et le barrage de Lower San Fernando (Californie) en 1971.

La figure suivante tirée du bulletin 188 de l'ICOLD met en regard les différentes causes de ruptures de barrage et permet de présenter la criticité relative des diverses causes de ruine, parmi lesquelles l'origine sismique est très minoritaire.

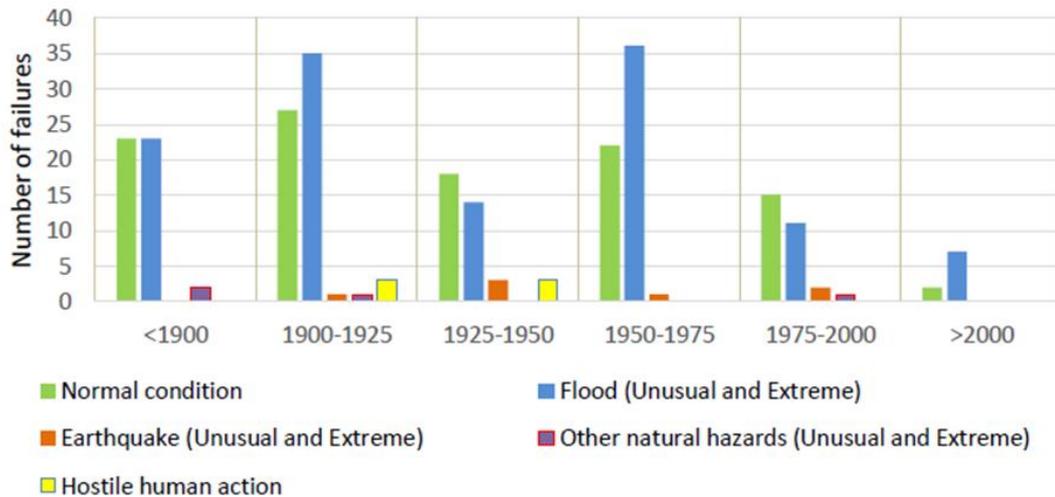


Figure 2 - Contexte de rupture selon la date de construction du barrage (selon [19])

2.1.2. Comparaison France/Japon

La France métropolitaine est un territoire qui présente une sismicité faible (globalement au niveau des bassins parisien ou aquitain) à modérée (pour les zones montagneuses). L'identification des événements sismiques ayant touché des barrages de par le monde met en évidence le poids du Japon dans ce REX [22].

Afin d'ajuster correctement le emploi du REX japonais dans un contexte moins sismique, il convient de mettre en regard les aléas sismiques Français et Japonais. Une année de REX sismique japonais est-elle équivalente à une année de REX sismique Français ?

Les courbes de Gutenberg-Richter [1] expriment la relation entre le nombre de séismes d'une magnitude supérieure à une magnitude donnée M et cette magnitude. Cette relation est décrite par l'équation suivante :

$$\log_{10} N(M) = a - bM$$

Où :

- $N(M)$ est le nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à M ,
- a est une constante qui dépend de la sismicité globale de la région,
- b est la pente de la courbe, généralement autour de 1, ce qui reflète la décroissance logarithmique du nombre de séismes avec l'augmentation de leur magnitude.

Cette loi fonctionne très bien à l'échelle globale, d'une région ou d'un pays.

Sur la figure suivante sont comparées les courbes de Gutenberg Richter cumulées sur un territoire de surface équivalente au Japon et en France et sur une période d'observation comparable. (Les données sont tirées de l'USGS [31] cumulées sur plusieurs années afin d'avoir des courbes stabilisées).

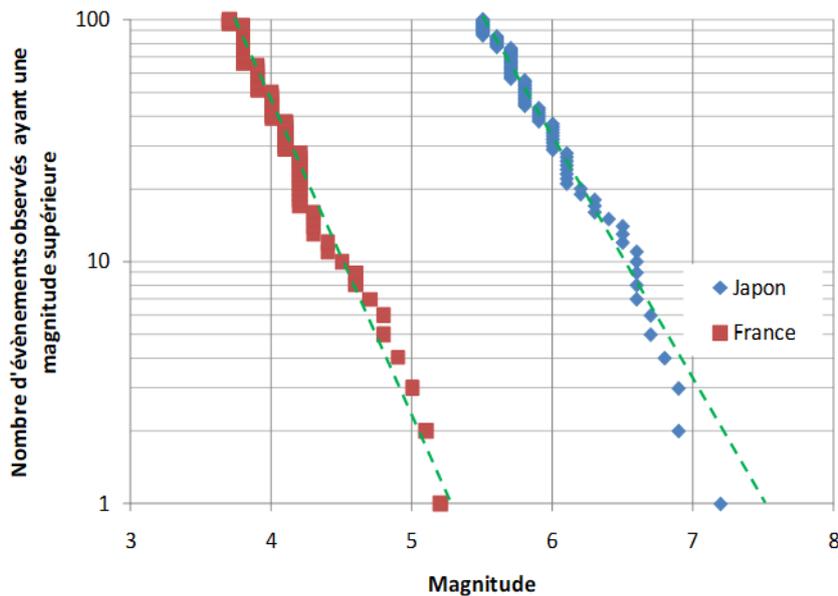


Figure 3 – Comparaison des courbes de Gutenberg Richter cumulées sur un territoire de surface équivalente et une durée équivalente au Japon et en France [31]

La théorie de Gutenberg Richter (courbe vert pointillé) est bien retrouvée dans les deux contextes. Ces graphiques peuvent être analysés de deux manières :

- Soit un décalage d'un facteur 100-200 en nombre d'événements entre le Japon et la France : un an d'observation du REX sismique au Japon revient à ~100 ans d'observation de séismes en France.
- Soit un décalage de 2 points de magnitudes entre les deux contextes : ce qui revient à dire qu'un séisme de magnitude M en France a la même période de retour qu'un $M+2$ au Japon. Autrement dit le séisme de Tohoku de 2011 de magnitude 9 à 80 km des côtes, peut être comparé dans le contexte français à un séisme de magnitude 7 à 80 km d'un site, (soit une accélération d'environ $0.06g$, ce qui est inférieur aux niveaux sismiques forfaitaires de l'ATB¹ : l'événement extrême de Tohoku traduit dans le contexte français se révèle donc couvert par les niveaux sismiques réglementaires). (cette comparaison conserve la distance aux côtes, car il n'y a pas de faille sous le territoire japonais pouvant générer une magnitude 9).

Afin de bien confirmer ces ordres de grandeur, en particulier pour des événements de plus forte magnitude, une analyse est menée à partir de la base de séismes ISC-GEM qui permet d'assurer une cohérence dans la définition des magnitudes au niveau global et sur le dernier siècle [32] : une zone de surface comparable ($250\,000\text{ km}^2$) est retenue pour la France métropolitaine et pour le Japon : tous les séismes recensés depuis 1900 et de magnitude supérieure à 5.5 sont cumulés dans les deux zones. L'ordre de grandeur est bien retrouvé (2 points de magnitude / facteur 100 sur le nombre de séismes) : 198 séismes de magnitude supérieure à 5.5 depuis 1900 au Japon contre 3 en France métropolitaine.

Le Japon est donc une source de retour d'expérience sismique très intéressante pour se faire une idée de la robustesse des barrages au séisme. De plus, le pays compte 1900 grands barrages (au sens de la CIGB), avec un âge moyen de 50 ans. Cela revient à environ 110 000 années d'observation cumulées pour le Japon. Traduit dans le contexte français, 100 fois moins sismique ce retour d'expérience représente l'équivalent de près de dix millions d'années d'observation de barrages soumis au séisme

¹ Selon la loi d'atténuation de Berge-Thierry et co-auteurs de 2003, établie à partir d'enregistrements de séismes européens et californiens et préconisée par la règle RFS 2001-01.

dans le contexte sismique de la France métropolitaine. Une bonne compréhension du comportement des barrages japonais sur ces 50 dernières années est donc la clé pour juger du risque sismique sur nos ouvrages.

Cette considération est mise en évidence par la publication [22] qui identifie les cas de barrages soumis à des séismes répondant au critère d'inspection post sismique de la CIGB (loi magnitude/distance décrite dans [7]). L'objectif de cette publication n'est pas de se baser sur les publications post sismiques qui se focalisent essentiellement sur les désordres observés, mais de croiser les bases de séismes et la position des barrages de la base CIGB des grands barrages afin d'identifier tous les grands barrages s'étant bien comportés lors de leur sollicitation par un séisme important.

En particulier, cette publication souligne que plus de la moitié du retour d'expérience mondiale (positif ou négatif) est associé aux barrages japonais.

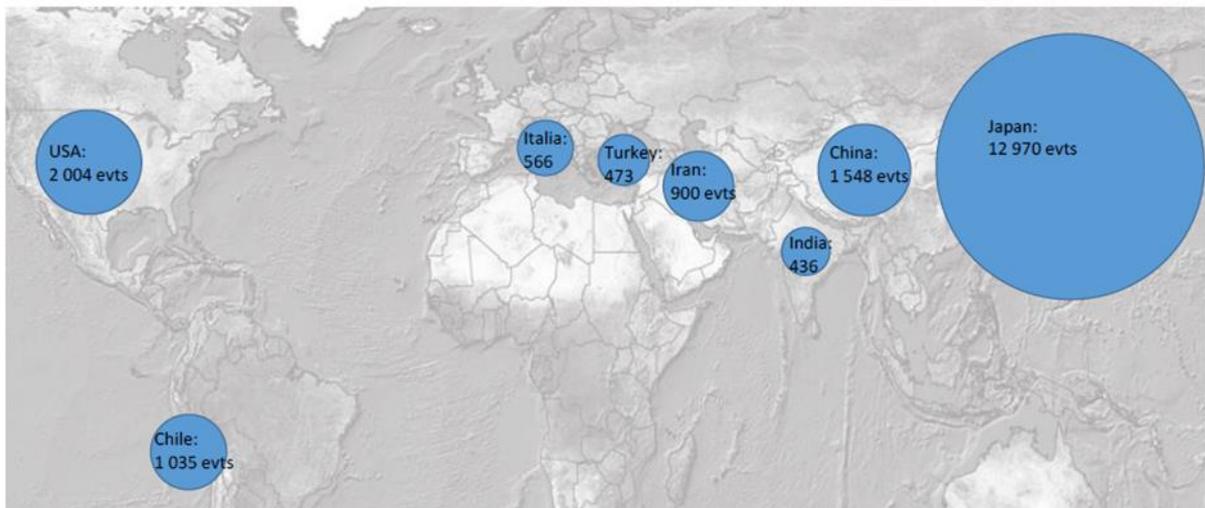


Figure 4- Pays présentant le plus grand nombre de cas de barrages soumis à des séismes (selon le critère CIGB) [22]

En comparaison, cette même analyse identifie 20 cas de barrages soumis à un séisme en France qui correspondent en majorité au séisme de magnitude 5.7 du 13 août 1967 qui s'est produit dans les Pyrénées non loin d'Arrette. Les rapports concernant ce séisme ne font état d'aucun impact direct sur les barrages pyrénéens.

Remarque : la question de la cohérence de la robustesse sismique des ouvrages japonais et français se pose : en effet, il serait possible que les Japonais aient dimensionné leurs ouvrages avec des spécificités les rendant plus robustes au séisme. Or il apparaît que la géométrie des ouvrages n'est pas radicalement différente et comme observé lors de la campagne post-sismique par l'AFPS[28], les barrages japonais sont conçus a priori sur la base de calculs pseudo-statiques avec des valeurs d'accélération horizontale comparables aux valeurs réglementaires retenues pour les barrages français (cf. 1.3).

1.2 Rex récent : Turquie 2023

Selon [29] publié récemment, la séquence sismique (dont l'un des chocs présente une magnitude de 7.8) qui s'est produite le 6 février 2023 en Turquie, à Kahramanmaraş, a eu un impact significatif sur 140 barrages, dont la plupart se situent à moins de 50 km de la projection en surface de la rupture de faille. Ces barrages ont subi des niveaux d'intensité sismique modérés à élevés, avec une accélération maximale du sol (PGA) estimée entre 0.1 et 1.3 g pendant le séisme de Pazarcık, et entre 0.15 et 0.45 g lors du séisme d'Elbistan, en fonction de leur proximité avec la rupture de faille (sachant que certaines stations proches des barrages ont vu plus de 2 g). Bien que tous les barrages aient réussi à

maintenir leurs capacités de rétention d'eau, certains ont souffert de déformations permanentes modérées à importantes.

Dans le cadre des mesures d'intervention d'urgence, les niveaux d'eau de deux de ces barrages, Sultansuyu et Arıklıkaş, ont été abaissés de manière contrôlée. Après les tremblements de terre, une enquête approfondie sur toutes les structures hydrauliques situées dans la zone d'influence a été menée, et les résultats sont présentés dans cette étude. Ils ont révélé que les barrages en remblai en terre et en enrochement ont subi des dommages plus importants que les barrages en béton, en particulier dans les zones proches de la rupture de faille, où l'intensité des secousses était la plus forte. Il a été observé que les déplacements permanents augmentaient systématiquement avec la hauteur de la section transversale du barrage. Il a aussi été observé un bon comportement de structures annexes comme les évacuateurs en béton armé.

Dans l'objectif de rassembler les observations de l'impact de ce séisme exceptionnel sur les barrages, EDF a participé à une mission de reconnaissance post-séisme au sein de l'Association Française de Parasismique (AFPS) afin de recueillir des données concernant les dommages subis par les barrages avant que les travaux de réparation commencent [25].

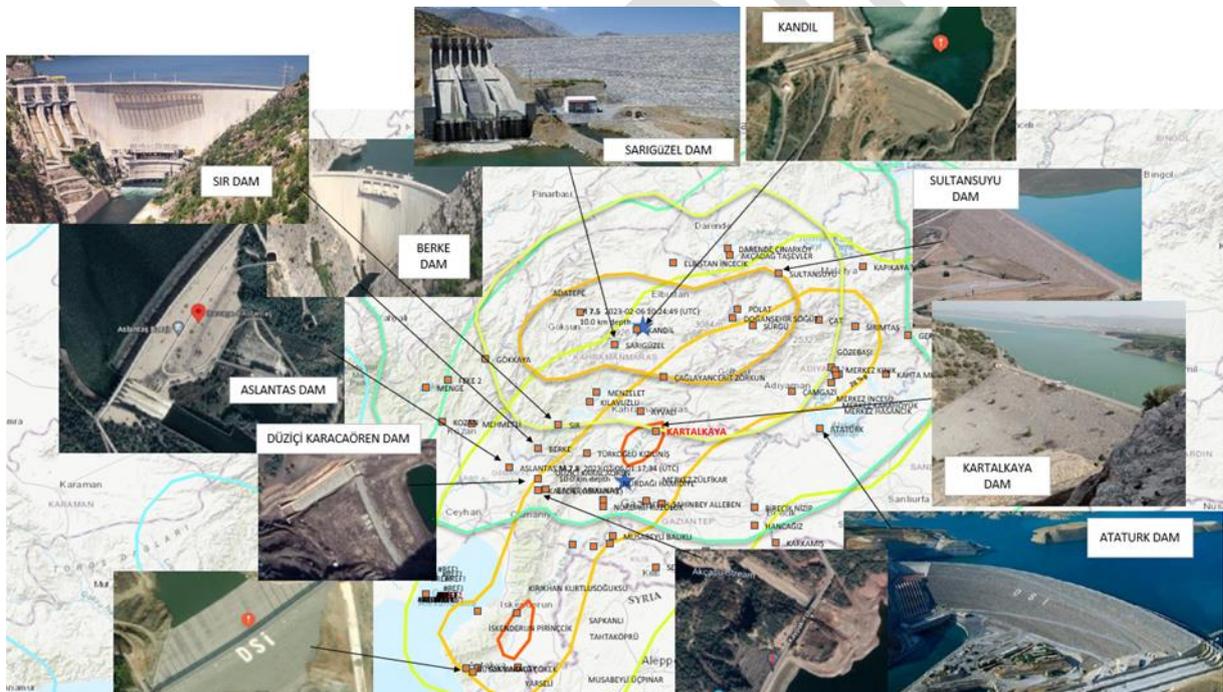


Figure 5 - Localisation des principaux barrages par rapport aux cartes d'accélération estimées par l'USGS pour les séismes de Pazarcık et d'Elbistan [25]

Station (Code)	Distance du barrage le plus proche	Séisme du 06/02/2023 – 4h17			Séisme du 06/02/2023 – 13h24		
		PGA (cm/s ²)			PGA (cm/s ²)		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD
0118	< 3km (Seyhan)	50	38	23	27	24	24
8003	20km (Kalecik/Ariklikas/Berke/Aslantas)	142	186	140	49	67	29
8002	<10km (Kalecik/Ariklikas/Berke/Aslantas)	243	203	337	66	46	29
8004	25km (Aslantas/Berke)	168	182	72			
4613	25km (Aslantas/Berke)	147	154	75	81	78	76
4618/7	10km (Kilavuzu)	126	159	134	56	83	55
3136	10km (Yarseli)	534	402	220	19	23	11
3124	20km (Yarseli)	573	638	578	22	32	12
4631	40km à l'Est de Kandil				388	337	610
4612	65km à l'Ouest de Kandil				635	523	494

Figure 6 - Accélération des stations sismiques locales proches des barrages [25]

La mission a pu inspecter 6 barrages : les barrages remblai de Seyhan et de Kalecik, le barrage en terre homogène d'Ariklikas, la voute de Berke, et les barrages remblais d'Aslantas et de Kilavuzu. Le REX est directement dérivé des observations *in situ* sans échange avec les techniciens sur place. Il est synthétisé sur le tableau ci-dessous. Il est néanmoins confirmé par les publications turques qui sont progressivement diffusées [29][30].

Les conclusions du rapport AFPS sont cohérents avec celles des autres synthèses :

- Bon comportement des barrages béton sans dégradation importante
- Bon comportement des ouvrages de vidange en béton armé
- Des dégradations (fissuration / tassement) sur les ouvrages en remblais

Nom	date de fin de construction	Type	hauteur	volume retenue	Evaluation PGA en pied	Observations AFPS
Seyhan	1953	remblai avec noyau d'argile	56m	1,2 km ³	~0.2g	Pas de dommages rapportés sur la digue Présence d'un pont roulant fonctionnel en crête
Kalecik	1985	remblai	80m	33 hm ³	0.15g	Amorces de glissement sur la pente amont Fissures en crête pluri centimétriques / assez profondes 6 vannes de l'EVC testées et opérationnelles après séisme.
Ariklikas	2000	terre homogène	25m	2,2 hm ³	0,25g en H et 0,3g en V	Eventrement du remblai très profond Glissements sur les deux pentes du barrage Barrage inexploitable Aucun dommage constaté sur l'évacuateur de crue
Berke	2001	voute	201m	427 hm ³	~0.25g	Conception COB Turbines non déclenchées (opérationnelles post sismique) Aucun dommage visible sur le barrage 4 vannes en partie haute - fonctionnelles après séisme Portique imposant en crête: pas de dégradation
Aslantas	1984	remblai	95m	74 hm ⁴	0,15g - 0,25g	Quelques tassements ou glissements sur les deux pentes amont et aval GC évacuateur en BA intègre
Kilavuzu	2011	remblai	54m	74 hm	0.15g	Légers glissements ou tassements sur la pente amont --> décrochements pluri centimétriques au bord de la route Quelques remontées sableuses GC évacuateur béton armé OK 6 vannes segment 8,50mx15,80m intégrées /étanches/fonctionnelles.

Figure 7 - Synthèse des observations faites sur les barrages par la mission post sismique AFPS [25]

On peut aussi citer l'article [30] qui explore la performance sismique et les dommages observés sur 17 barrages (principalement des barrages en remblai) en se basant sur les données collectées sur le terrain. Cet article est cohérent avec les observations faites par la campagne AFPS : les barrages en remblai n'ont pas mené à des lâchers d'eau non maîtrisés. Les dégradations recensées sont des tassements, des formations de fissures, ainsi que des glissements le long de surfaces planes ou circulaires.

On peut noter sur la Figure 8 ci-dessous, les observations faites par les auteurs sur le barrage de Kartalkaya, un ouvrage remblais de 56m mis en service en 1972 et localisé à l'épicentre du séisme. La

station la plus proche du barrage (TK-4614 à 5.5 km du barrage a mesuré plus de 2g d'accélération (2.05 g et 2.07 g suivant N-S et E-W respectivement).

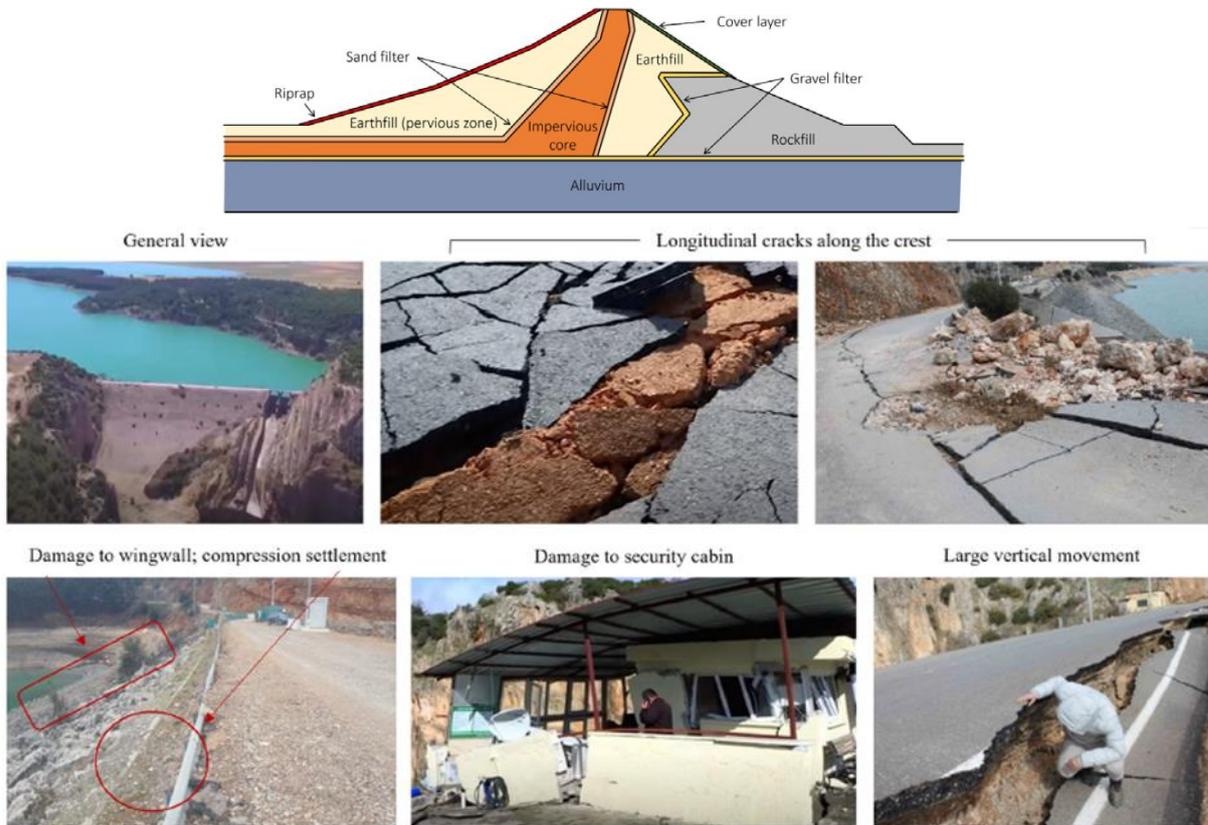


Figure 8 - Observations faites par les auteurs sur le barrage de Kartalkaya [30] et [29]

Une synthèse des tassements des barrages en remblais est effectuée (Figure 9 ci-dessous) et montre une cohérence des observations faites sur les barrages turcs avec une base internationale d'observations de comportement d'ouvrages en remblais suite à des séismes. La dénomination « Severe / Moderate / Light » est basée sur le système de classification de Pells & Fell ([10] présenté à l'ICOLD et caractérisé par la largeur maximale des failles longitudinales observées et le tassement relatif).

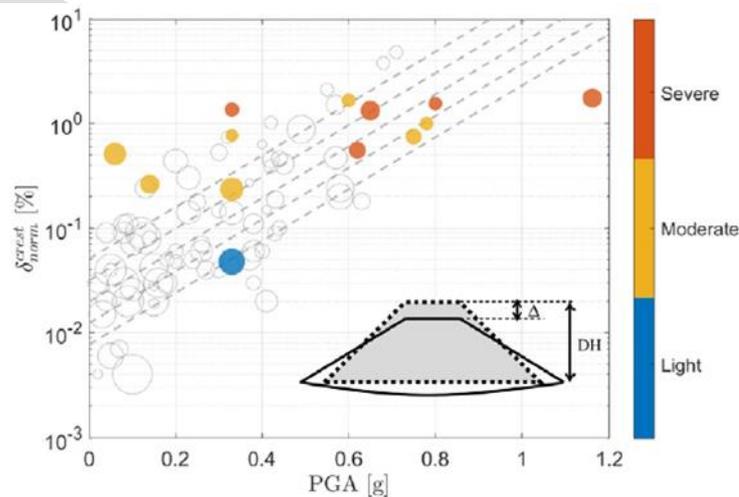


Figure 9 - Tassements relatifs à la taille des barrage, mesurés à la suite des séismes turc – comparaison aux données tirées d'autres ouvrages du REX international [29]

L'article de Mr Kemal Onder Cetin [30] décrit les conséquences des séismes turcs sur le barrage d'Erkenek, un barrage en enrochement de 39 m avec parement en géomembrane, recouvert d'un revêtement en béton d'environ 10 cm d'épaisseur sur sa face amont.

Lors du séisme de 2023 (Pazarçık), une rupture de surface a traversé l'axe du barrage, provoquant un déplacement de 3,4 m du corps du barrage. Ce décalage latéral gauche a été cartographié sur une zone de cisaillement de 55 m. Des fissures de tension causées par le cisaillement parallèle à la crête ont également été observées, avec des largeurs de 18 et 30 cm, et le revêtement béton à l'amont a été endommagé, ainsi que la membrane dans la retenue. Le niveau du réservoir était à sa capacité de stockage minimale pendant la séquence sismique de Kahramanmaraş.

D'après la référence [30], des études vont être engagées sur ce cas particulier.



Figure 10 - Cisaillement de la crête du barrage – cisaillement et dégradation de la membrane dans la retenue [21]

1.3 Rex Récent : Japon 2024 [26][28]

Le 1^{er} janvier 2024, la péninsule de Noto, au Japon, a été frappée par un séisme de magnitude de moment de 7.5-7.6. L'épicentre se trouvait à l'extrémité Nord-Est de la péninsule. Ce séisme a été ressenti avec une intensité JMA (~Intensité MSK) égale ou supérieure à six sur l'ensemble de la péninsule. Le séisme de Noto a été à l'origine de 245 décès et 320 blessés graves. 8754 bâtiments ont été détruits et 18 986 sévèrement endommagés. Il a généré un tsunami observé sur toute la façade Nord-Ouest du Japon, de Kyushu à Hokkaido. La zone concernée par des dégâts liés au séisme est très grande et de la liquéfaction des sols a été observée jusqu'à Niigata.

La péninsule de Noto possède de nombreux barrages, gérés principalement par le Département des travaux publics du gouvernement préfectoral d'Ishikawa. Ce sont des barrages destinés à l'irrigation, à la gestion des crues, ou encore au stockage d'eau potable. Ils ne sont donc pas associés à des usines hydroélectriques.

Selon le Ministère des Terres, des Infrastructures, des Transports et du Tourisme (MLIT), 94 barrages ont été inspectés suite au séisme sans présenter de dommage.

- aucun barrage n'a rompu,
- trois barrages (Oya, Kitakawachi, Hakkagawa) ont enregistré des accélérations supérieures à 300 gal (~0.3g),

- des dommages ont été observés sur deux ouvrages, le barrage en enrochement de Oya et le barrage poids de Kitakawachi. Sur ces deux ouvrages des mesures d'urgence ont été prises.

Nom des barrages	Type de barrage	Année construction	H (m)	L (m)	Volume eau (Mm3)	Distance épiscopentrale (km)
Jike	Enrochement	1977/1991	35,4	221	0,62	4,7
Iwasaka	Remblai	1972/1984	31,5	158	0,85	3,3
Wakayama	Remblai	1963	25,4	87,2	0,486	12,4
Oya	Enrochement	1973/1992	56,5	240	3,05	14,5
Kitakawachi	Poids	1991/2010	47	140	2,86	24,3
Fukumitsu	Enrochement	1977/1986	36,5	143,6	0,419	17,6
Yamaguchi	Enrochement	1970	27	110	0,392	19,5
Terada	Enrochement	1996/2007	26,7	103,8	0,460	29,5
Hakkagawa (Yatsugagawa)	Poids	1979/1994	52	144	3,13	46,8
Morohashi	Enrochement	1977/1986	35,2	120	1,725	35,4
Miyata bosai	Remblai	1972/1979	22,1	101,5	0,31	36,6

Figure 11 - Listes de barrages recensés dans la péninsule de Noto, à moins de 50 km de l'épicentre [28]

EDF-CIH a participé à la mission post sismique organisée par l'AFPS afin de récupérer le retour d'expérience des barrages localisés dans la zone épiscopentrale.

Un travail de compréhension des codes de dimensionnement des barrages au séisme a mis en évidence que les barrages étaient conçus sur la base d'un calcul pseudo statique (cf. §2.1 plus haut) avec une accélération horizontale de 0.12g pour les barrages poids et 0.24g pour les barrages voute. Actuellement, les recommandations du MLIT 2005 [11] conseillent de réaliser la vérification de la performance sismique avec des approches dynamiques linéaires bien qu'une approche pseudo-statique avec un coefficient de 0.7 soit acceptée pour les barrages hydro-électriques de faible hauteur (inférieure à 30 m).

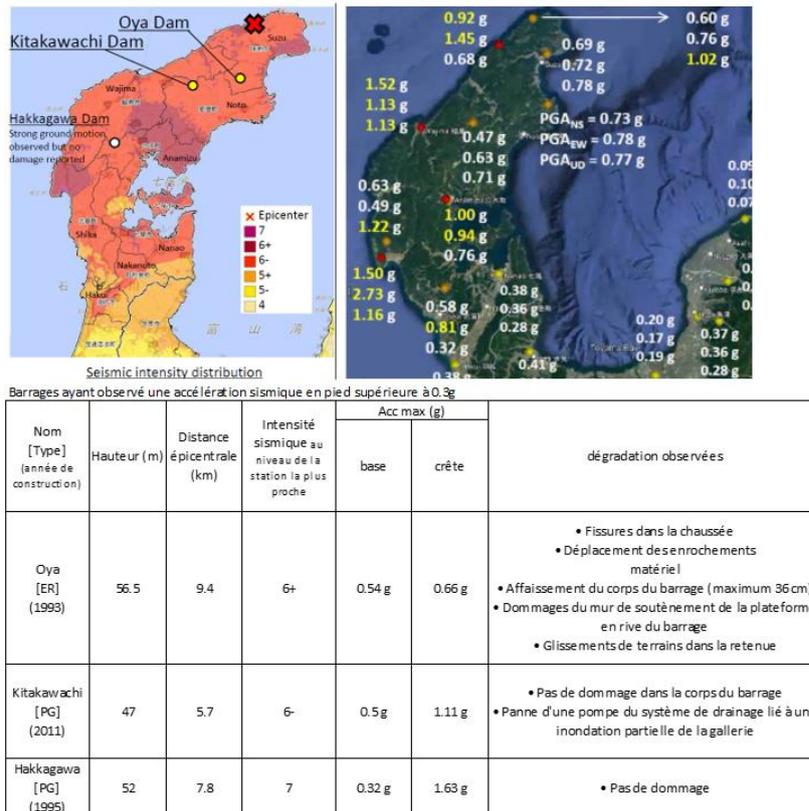


Figure 12 - Localisation des 3 barrages ayant observé plus de 0.3g en pied - accélération des stations de la péninsule de Noto - synthèse des observations faites suite au séisme par le Bureau de la gestion de l'eau [26]

1.1.1. Barrage en enrochements d'Oya

Le barrage d'Oya est un barrage en enrochement de 56,5 m de haut et 240 m de long avec un noyau central, construit dans les années 1973 à 1992.



Figure 13 - Maquette du barrage de Oya présentant le zonage du corps du remblai

Le barrage d'Oya est le barrage qui a subi le plus de dommages durant le séisme de Noto du 1^{er} janvier 2024 d'après le MLIT [26]. Nous avons pu constater ces dommages sur place. Ils restent mineurs et sans atteintes aux fonctions de sûreté du barrage. Nous avons pu noter qu'un abaissement du plan d'eau avait été réalisé, suggérant le bon fonctionnement de la vidange de fond. Il s'agit d'une observation essentielle dans un contexte sismique aussi fort, et qui vient alimenter un retour d'expérience positif et optimiste sur le bon comportement des organes des barrages sous forte sollicitation sismique.



Figure 14 - Bloc renversé depuis la crête - Fissure en crête (déjà inspectée et protégée)

1.1.2. Barrage poids de Hakkagawa

Le barrage écrêteur de crue d'Hakkagawa est un barrage poids mis en service en 1994, de 52 m de haut et reposant sur un rocher volcanique de tuf andésitique. Le niveau du seuil se situe à 130.6 m pour un niveau minimal de 117.0 m et un niveau maximal de 142.0 m. Sa crête est à 146 m et le fruit aval est de 0,78.

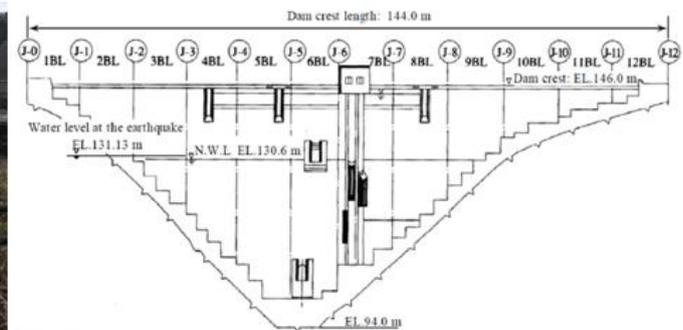


Figure 15 - Vue d'aval et plan vu de l'amont du barrage de Hakkagawa

Bien que le barrage de Hakkagawa ait subi une forte intensité sismique, il ne présentait pas de dommages particuliers lors de notre visite. Le niveau de l'eau à RN lors de la visite montre qu'un retour à une situation normale a eu lieu moins de 2 mois après le séisme, voire qu'il n'a pas connu de situation transitoire après le séisme. Des traces du séisme de 2007 ont été retrouvées sur l'ouverture de joint, et contrairement au séisme de 2007, il y a eu en 2024 peu de dissipation d'énergie, résultant en une amplification plus forte en crête et peu de dommages observés.

Les observations et le retour d'expérience que nous apporte ce barrage poids dans une zone à intensité sismique maximale est très positif et démontre le bon comportement de ces barrages sous fortes sollicitations sismiques, même avec des séismes à répétition sur le long terme.

3. CONSIDERATIONS SUR LA PERCEPTION DU RISQUE SISMIQUE DES BARRAGES ET LA REALITE OBSERVEE

Dans son article présenté au 27ème Congrès des Grandes Barrages en 2022 [24], Roger Bremen (bureau Lombardi) explore les risques de défaillance des barrages à travers une analyse des données statistiques mondiales et il insiste tout particulièrement sur la place accordée au risque sismique dans la conception et l'évaluation de ces infrastructures. Bien que le risque sismique soit une considération essentielle pour bon nombre d'infrastructures et de bâtiments, l'auteur critique l'importance accordée à ce facteur dans le domaine des barrages, en mettant en avant que les statistiques montrent une probabilité relativement faible de rupture liée aux tremblements de terre. Ce constat conduit à une remise en question de la hiérarchisation des priorités en matière de sécurité des barrages et à une

proposition de revalorisation d'autres risques, comme ceux de surverse et d'érosion interne, qui représentent des risques bien plus probables selon Bremen.

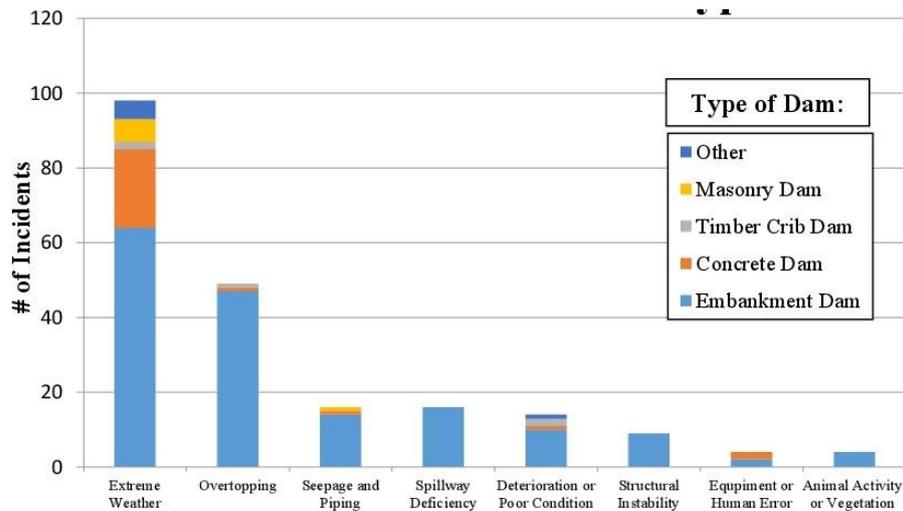


Figure 16 – Ruptures de barrage par type et événement initiateur d'après Bremen [24]

Selon Bremen, il est statistiquement 35 fois plus probable qu'un barrage en remblais subisse une rupture par crue extrême ou surverse que par un séisme. Pour les barrages en béton, ce rapport est encore plus important considérant qu'aucune rupture au séisme de grand barrage en béton n'a été observée (hormis le cas particulier de Shi Kang, construit à cheval sur une faille sismique).

Dans ces conditions, une amélioration de la résistance au séisme des barrages, n'aurait qu'un impact très marginal sur les statistiques de rupture de barrage, et le risque global auquel les barrages exposent les populations.

Malgré cela, la sécurité sismique a souvent été placée au centre des préoccupations dans la construction et la maintenance des barrages. Selon Bremen, cette attention disproportionnée au risque sismique résulte en partie de l'impact des tremblements de terre sur d'autres types de structures et des pertes humaines associées aux catastrophes naturelles. Dans l'esprit collectif, les séismes sont effectivement responsables d'importants dommages sur les bâtiments, les infrastructures urbaines et les ouvrages de génie civil, ce qui a conduit à accorder une grande priorité à l'amélioration de la sécurité dynamique de toutes les structures, y compris les barrages.

Ce point est bien illustré par la figure ci-après synthétisant la mortalité globale mondiale due aux catastrophes naturelles. Jusque dans les années 1970-80, les inondations et sécheresses étaient, de loin, les causes principales de mortalité. Ces dernières décennies, le paradigme a évolué. Par comparaison aux inondations et sécheresse, le séisme est devenu une cause principale de mortalité dans le registre des catastrophes naturels. Des séismes historiques tels que ceux du Mexique, de l'Arménie, de Sumatra (2004), ou plus récemment du Japon (Tohoku) et de Turquie (2023) ont marqué les opinions publiques et les consciences avec des bilans de plusieurs dizaines de milliers de victimes, plus parfois.

De fait, de nombreux bâtiments et infrastructures anciens, sans conception parasismique et des mécanismes de rupture fragiles, se révèlent extrêmement sensibles au risque sismique. Ces structures ont en général été conçues pour reprendre des efforts essentiellement verticaux. Les contraintes horizontales générées par les séismes dépassent alors leur capacité de résistance. A contrario, les barrages sont, par principe, conçus pour résister essentiellement à d'importants efforts horizontaux,

voire verticaux « vers le haut » de sous-pression. Ils sont ainsi intrinsèquement conçus pour reprendre essentiellement les efforts horizontaux. Dans ces conditions, pour des séismes faibles à modérés, les surcharges sismiques sont reprises par les marges de dimensionnement existantes en situation normale ou exceptionnelle. Cela est très cohérent avec le constat général du retour d'expérience qui a été précédemment évoqué et que Bremen analyse. Les études de cas de barrages ayant subi des tremblements de terre sans s'effondrer mettent en lumière cette robustesse : bien que certains barrages aient été endommagés, la plupart n'ont pas compromis leur fonction « retenir l'eau » et sont encore en service aujourd'hui. Par ailleurs, les matériaux de construction, les fondations et la conception globale des barrages offrent souvent une meilleure absorption et dissipation de l'énergie sismique, réduisant ainsi les risques de rupture. Les barrages présentent dans ces conditions une sensibilité moindre aux séismes, sauf singularités ou fragilités particulières de conception (par exemple présence de zones liquéfiables, élancement ou singularité géométrique favorisant les concentrations de contrainte etc.).

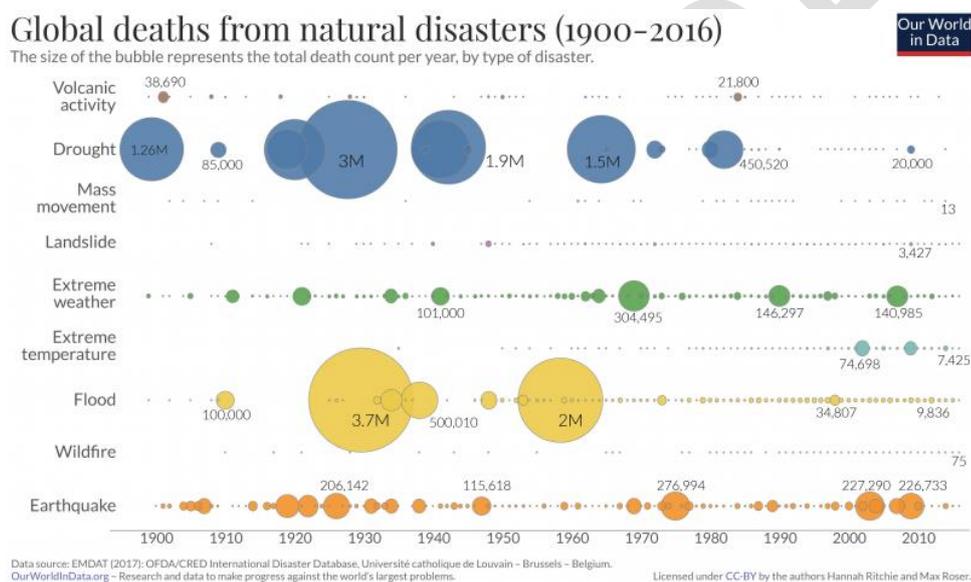


Figure 17 – Létalité causée par les catastrophes naturelles repris par Bremen [24]

Bremen met également en avant l'exemple de barrages dans des régions à haute activité sismique, comme le Japon, qui ont résisté à de nombreux séismes de magnitude élevée sans rupture majeure.

Face à ces observations, Bremen appelle à une révision des pratiques actuelles et de la hiérarchisation des efforts en matière de sécurité des barrages, afin d'accorder plus d'attention aux facteurs de risque qui représentent des causes de défaillance plus probables que sont par exemple les risques en situation de crue (érosion externe) ou les risques d'érosion interne en situation normale pour les barrages en remblai.

Bremen introduit les concepts de "vulnérabilité" et d'incertitude dans l'analyse de la sécurité des barrages en se concentrant sur les faiblesses propres à chaque barrage, pour mieux cibler les mesures de sécurité à mettre en place.

En conclusion, Bremen appelle à un réajustement des pratiques de sécurité pour les barrages, en prônant une approche basée sur les vulnérabilités spécifiques et la réduction des incertitudes liées aux facteurs de risque. Bien que le risque sismique soit une préoccupation importante, ses effets sur les barrages ne justifient pas toujours le niveau d'attention qui lui est accordé par rapport à d'autres menaces plus avérées, telles que la surverse et l'érosion interne. Pour Bremen, cela permettrait une

gestion des risques plus efficace et une allocation plus judicieuse des ressources en vue d'améliorer globalement la sécurité des barrages.

4. ANALYSE DE RISQUE SISMIQUE DES BARRAGES EN BETON EN FRANCE METROPOLITAINE

Avec la généralisation des inspections post-sismiques, le retour d'expérience international sur le comportement au séisme des barrages en béton ne cesse de progresser. Il s'améliore tant en nombre d'ouvrages touchés par des séismes et inspectés (rien qu'après le Tohoku plus de 240 barrages béton ont été inspectés dans la zone touchée par le tremblement de terre) qu'en nombre d'ouvrages ayant subi de fortes accélérations : en 2000, l'USSD [9] notait qu'une vingtaine de barrages bétons avaient subi plus de 0.2g ; en 2014, selon [15] près d'une vingtaine ont subi plus de 0.3g (6 en plus depuis 2000). 19 de ces barrages (11 barrages poids, 7 voûtes et 2 à contrefort) ont fait l'objet d'une analyse dans Nuss et al. (2012) [13]. La figure ci-après extraite de la même référence montre de nombreux autres barrages en béton dans les préfectures de Iwate, Miyagi, Fukushima, Tochigi and Ibaragi qui auraient également subi des accélérations supérieures à 0,3g.

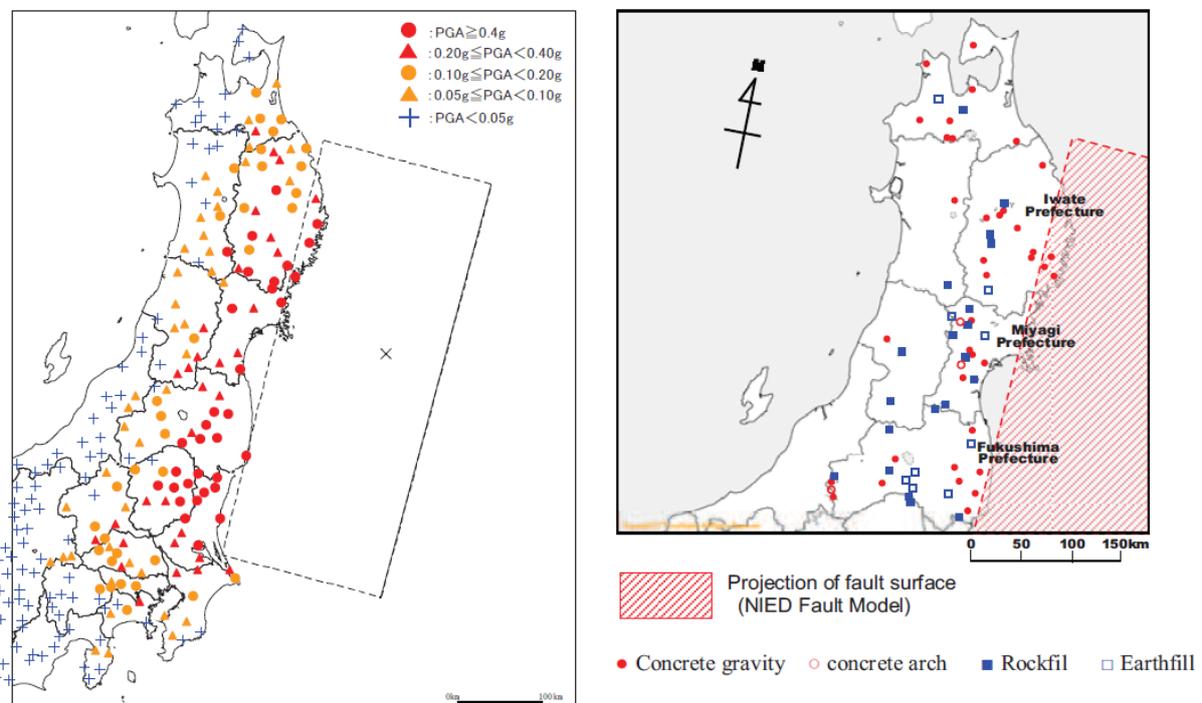


Figure 18: figures extraites de Nuss et al. (2012) [13] donnant à gauche les niveaux de PGA enregistrés et à droite la position des différents types de barrages

A l'échelle internationale, parmi tous les barrages béton ayant subi de très fortes sollicitations, la seule rupture est celle du barrage de Shih Kang construit sur une faille ayant présenté un rejet plurimétrique. Des désordres significatifs ont été observés sur uniquement 4 autres ouvrages, à savoir Koyna [4], Pacoima et 2 barrages à contreforts. Les 14 autres ouvrages se sont donc bien comportés et ne présentaient pas de dommage structurel lors des inspections post-sismiques.

En conclusion, Nuss et al. (2012) indiquent que le seuil de dommage pour les barrages béton poids et voûte bien conçus et bien réalisés est probablement bien supérieur à 0,3g, et que pour les barrages à contrefort, une fissuration est possible en partie supérieure de l'ouvrage, à la rupture de pente entre les contreforts et la partie verticale du barrage. Hansen (2020) [12] observe qu'en aucun cas, un barrage béton n'a été endommagé pour un PHGA (Peak Horizontal Ground Acceleration) inférieur à

0,5g. Fort de ce constat, il s'interroge même sur le besoin d'étude au séisme sur des barrages en béton bien conçus pour des PHGA inférieurs à cette valeur.



Figure 19 – Barrage voûte de Pacoima (à droite, USA) et barrage poids de Kasho (à gauche, Japon) qui ont tous deux connus des accélérations en crête > 2 g selon Nuss [13]

Parmi les enseignements pointés dans Nuss et al. (2012) [13] et Hansen (2020) [23], on notera en particulier que pour les barrages en béton :

- Les dommages, lorsqu'il y en a, se produisent en partie supérieure des ouvrages où les accélérations peuvent être fortement amplifiées, et souvent au niveau des structures annexes telles que des caniveaux, des locaux de surveillance, de contrôle, de manœuvre de vannes ;
- En revanche, peu d'augmentation de fuite ou de montée de pression significative ont été constatées en fondation et elles ont toujours été temporaires.
- Les accélérations en crête peuvent dépasser 2g (mesurées sur au moins 3 ouvrages Pacoima, Kasho et Takou) ;
- Il n'est pas constaté de dommage additionnel lors des répliques ou d'un autre événement sismique majeur.

Hansen (2020) développe les éléments d'explication au bon comportement au séisme des barrages béton vis-à-vis des potentiels modes de défaillance :

- L'apparition d'une fissure n'est pas un mode de rupture. Les barrages béton sont des structures massives permettant facilement un report d'effort des zones fissurées vers les zones intègres.
- Un mode de rupture classiquement admis est la création d'un bloc de béton isolé suite à la génération de fissures s'étendant à travers le barrage, puis le glissement ou renversement de ce bloc pendant ou après le séisme (kinetic block). Si des fissures ont bien été observées en partie supérieure des barrages, on n'a encore jamais observé de bloc isolé.
- La durée des séismes serait trop courte pour générer un réseau de fissures délimitant un bloc isolé et en provoquer la rupture par glissement ou par renversement. La résistance dynamique du béton meilleure que sa résistance statique augmente la résilience du barrage. L'apparition des premières fissures et l'ouverture des joints de plots tendent à accroître l'amortissement ce qui réduit l'impact du séisme sur le barrage.
- Les effets tridimensionnels, qu'il s'agisse de la forme arquée du barrage ou du caractère encaissé de la vallée, réduisent le risque de rupture par glissement. On n'a encore pas observé de glissement d'un plot sur sa fondation lors d'un séisme.

La sismicité en France métropolitaine a conduit à retenir des valeurs forfaitaires d'accélération maximale au rocher (nature de fondation des barrages en béton) au plus égale 0,3g pour les barrages de classe A. Cette valeur est inférieure à seuil d'apparition des dommages donnée par Nuss et al. (2012) et Hansen (2020) pour les barrages béton poids et voûte bien conçus et bien réalisés.

L'exploitation du retour d'expérience au séisme, très favorable pour les barrages béton dans le contexte sismique français, demande d'explicitier les notions de « bien conçu et bien réalisé ». Il est proposé une analyse technique en partie qualitative basée sur les points suivants :

- Robustesse de conception et qualité de construction / réalisation
 - Traitement de la fondation : fondation au « bon rocher », qualité de l'interface béton / rocher (traitement, injections etc..).
 - Absence de singularité géométrique ou de conception (par exemple pas de changement d'inertie très marqué en partie supérieure de l'ouvrage, élancement des structures..).
 - Absence de faille active sous l'ouvrage (construction sur faille active en principe non autorisée en France..).
- Analyse du comportement historique de la structure depuis la mise en eau par le biais d'un système d'auscultation et d'une surveillance appropriée. Absence de comportement pathologique marqué (absence de déplacement irréversible, d'une piézométrie élevée, d'importants débits de fuite, etc..).
- Analyse de l'état du barrage (niveau de fissuration, ...)
- Etude de stabilité à RN en situation normale démontrant l'existence des marges de sécurité usuelles avec un corpus d'hypothèses raisonnables
- Niveau sismique : un PGA suffisamment faible (typiquement <0.35-0.4 g: ce qui est le cas en France métropolitaine.

Si toutes ces conditions sont réunies, la réalisation d'études complexes (dynamiques transitoires, non linéaires etc..) n'apparaît pas nécessaire dans le cadre de l'EDD et de l'analyse de risque.

En termes de cotation dans les EDD, EDF-CIH utilise une approche semi-quantitative pour l'évaluation des événements initiateurs dans les arbres des causes, à partir du tableau d'occurrence issu de l'arrêté ICPE de 2005. Avec toutes les conditions sus-mentionnées réunies, sur la base d'une analyse « à dire d'expert », une proposition de cotation de l'évènement initiateur « séisme » de l'Évènement Redouté Central (ERC) « Rupture Barrage » serait :

- Alea sismique 0.25-0.35 => occurrence D
- Alea sismique 0.1-0.25 => occurrence E
- Alea sismique < 0.1 => EI non retenu dans l'analyse de risque.

A contrario, de nombreux ouvrages en béton pourront nécessiter des études avancées, et parfois des confortements physiques. Par exemple :

- Le barrage poids du Chambon est affecté d'une pathologie marquée de gonflement et des schémas de fissuration dans le plan vertical pouvant laisser craindre une déstabilisation d'une plaque « amont ». Le barrage a fait l'objet d'études complexes depuis de nombreuses années et de plusieurs phases de travaux de mitigation avec un confortement de la partie supérieure en 2015.
- Certains barrages anciens sont équipés de vannes plates avec des piles élancées. Ces piles sont parfois en maçonnerie, parfois creuse, parfois en béton non armé. Ces structures méritent en général des études spécifiques complexes qui peuvent parfois démontrer la stabilité de ces piles, ou au contraire nécessiter des renforcements (cas en Nouvelle Zélande pour le barrage poids de Whakamaru ou en Suisse pour le barrage de Chancy-Pougny).

- Des barrages poids en maçonnerie avec des profils élancés pourront également demander une attention particulière.
- Des barrages à conception particulière seront dans le même cas (Roselend et sa conception très atypique).

5. ANALYSE DE RISQUE SISMIQUE DES BARRAGES EN REMBLAIS EN FRANCE METROPOLITAINE

Les remblais étant majoritaires en nombre dans les pays sismiques comme dans le monde, le retour d'expérience sur ce type d'ouvrage est plus conséquent que pour les barrages béton. Les premières synthèses Ambraseys (1960) [2] puis Seed et al. (1977) [5] listent déjà plusieurs dizaines d'ouvrages ayant été affectés aux Etats-Unis et au Japon. Lors de séismes plus récents, plusieurs dizaines de grands remblais sont inspectés dans ces pays.

DGPR2014 [16] rappelle que mis à part les barrages de stériles miniers, qui relèvent d'une technique de construction particulière, la rupture du barrage de Fujinuma lors du séisme de Tohoku 2011 est la seule rupture de grand barrage ayant occasionné des victimes.

On recense toutefois sur les grands barrages en remblai, un nombre important de désordres assez significatifs avec des tassements pluridécimétriques (barrage d'Ono, de Cogoti) avec des fissures longitudinales en crête ou en parement pouvant atteindre plus de cent mètres de longueurs, des ouvertures jusqu'à la dizaine de centimètres et pénétrer de plusieurs mètres en profondeur, ou encore des fissures transversales (barrage d'Austrian [20]).

En intégrant les petits barrages, la liste des ruptures approche les quarante barrages. On pourra noter le cas du barrage de Sheffield en 1925 (liquéfaction), une dizaine de rupture de petits barrages lors des séismes de Kanto (1939), de Tokochi-Oki (1968) et de quelques ouvrages lors des séismes de Bhuj en Inde (2001) et de Kobé (1995). Elles concernent majoritairement des ouvrages anciens, construits avec des moyens rudimentaires, sans compactage et sur des sols de nature sableuse et peu denses.

Les modes de défaillances au séisme pour barrages en remblai mis en évidence par le retour post-sismique sont :

- Liqéfaction principalement ou problème de qualité de réalisation (faible compactage...)
- Les tassements pouvant induire une perte de revanche (exacerbés par les montées de pression interstitielle)
- Grands déplacements pouvant cisailer le noyau ou le filtre (exacerbés par les montées de pression interstitielle)
- Erosion post-sismique suite à fissuration (surtout transversale)

A l'inverse, de nombreux ouvrages, majoritairement des ouvrages récents (postérieurs à la 2^{ème} guerre mondiale) et construits avec des moyens modernes, se sont aussi bien comportés lors de séismes violents, ne présentant que peu de désordres (Aratozawa qui a subi 1g en pied, Ishibushi environ 0.5g).

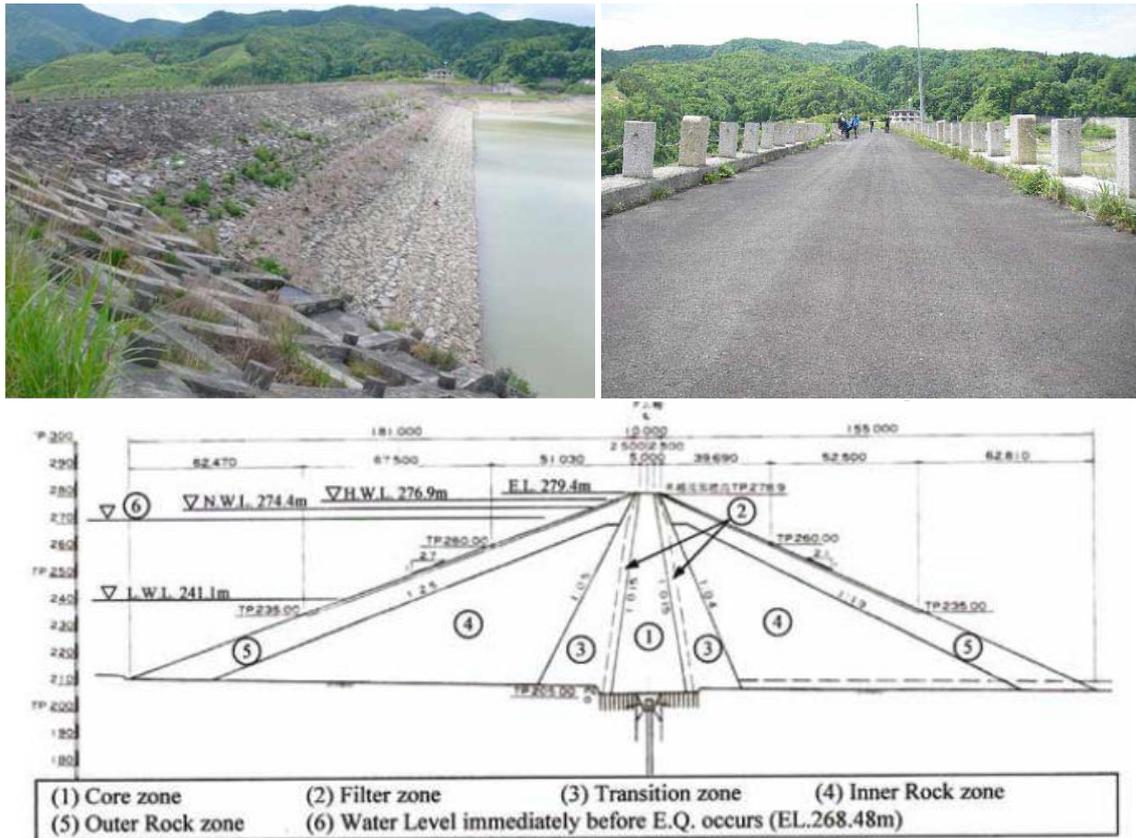


Figure 20 – Barrage en remblais d'Aratozawa ayant connu un séisme > 1 g au sol, extrait de USSD (2014) [15]

DGPR (2014) [16] conclut pour les remblais que :

« Le retour d'expérience mondial est qu'aucun grand barrage en remblai d'une hauteur supérieure à 15 m, de conception moderne, ne s'est rompu après séisme. Au Japon, seuls ceux construits avant 1918 ont été sérieusement touchés par les séismes et un seulement s'est rompu ».

En 1997 Seed et al. étaient encore plus directifs dans leur conclusion :

“Since there is ample field evidence that well-built dams can withstand moderate shaking with peak accelerations up to at least 0.2g with no harmful effects, we should not waste our time and money analyzing this type of problem--rather we should concentrate our efforts on those dams likely to present problems either because of strong shaking or because they incorporate large bodies of cohesionless materials (usually sands) which, if saturated, may lose most of their strength during earthquake shaking and thereby lead to undesirable movements”.

Les premiers mettent l'accent sur la date de réalisation de l'ouvrage, soit implicitement sur le niveau de conception et les moyens de réalisation à disposition à cette date, les seconds insistent sur le niveau de sollicitation, a minima 0.2g et sur la nature des matériaux (matériau sans cohésion et peu dense).

A date, il n'existe pourtant pas, à notre connaissance, de règlement ou de recommandation, qui permettrait d'exclure simplement la problématique sismique sur les remblais, pour des zones à séisme modéré.

L'USBR (2015) a proposé une synthèse de la conclusion énoncée par Seed et al. (1977) [5] et de la connaissance des mécanismes de rupture, et permet de se passer d'une approche en déformation moyennant la vérification de certains critères qualitatifs et quantitatifs.

⇒ A l'instar de la proposition faite pour les barrages en béton dans la partie précédente, il est proposé une analyse technique en partie qualitative basée sur le jugement d'expert s'appuyant notamment sur les critères USBR pour se passer des calculs en déformation, et sur une estimation des désordres par des méthodes simplifiées. Cette démarche reste finalement assez similaire aux principes énoncés dans le guide DGPR (2014) [16].

Il s'agit de porter un avis sur des aspects qui constituent pour certains des barrières techniques :

- Robustesse de conception et qualité de construction / réalisation
 - Traitement de la fondation : Traitement, injections, etc..
 - Conception : Type de remblais (hydraulique, homogène / zoné..), type d'étanchéité, existence de singularités géométriques.
 - Qualité de la construction, qualité du compactage
 - Matériaux employés
 - L'absence d'horizon liquéfiable
 - Absence de faille active sous l'ouvrage (construction sur faille active en principe non autorisée en France...).
- Analyse du comportement historique de la structure depuis la mise en eau par le biais d'un système d'auscultation et d'une surveillance appropriée. Absence de comportement pathologique marquée (fuites, piézométrie, tassement etc..).
- Analyse de l'état du barrage
- Etude de stabilité à RN en situation normale démontrant l'existence des marges de sécurité usuelles avec un corpus d'hypothèses raisonnables
- Une estimation de l'ordre de grandeur des déplacements et des dommages potentiels, a minima avec une méthode simplifiée pseudo-dynamique sur abaque, applicable jusqu'à 0.35 g.
- Niveau de revanche existante, protection contre l'érosion interne,
- Niveau sismique : un PGA suffisamment faible (typiquement <0.35): ce qui est majoritairement le cas en France métropolitaine hors phénomène d'amplification lié à l'effet de site).

Si toutes ces conditions sont réunies, la réalisation d'études complexes (dynamiques transitoires, non linéaires etc..) n'apparaît pas nécessaire dans le cadre de l'EDD et de l'analyse de risque.

En termes de cotation dans les EDD, EDF-CIH utilise une approche semi-quantitative pour l'évaluation des événements initiateurs dans les arbres des causes, à partir du tableau d'occurrence issu de l'arrêté ICPE de 2005. Avec toutes les conditions sus-mentionnées réunies, sur la base d'une analyse « à dire d'expert », une proposition de cotation de l'évènement initiateur « séisme » de l'Evènement Redouté Central (ERC) « Rupture Barrage » serait :

- Alea sismique 0.25-0.35 => occurrence D
- Alea sismique 0.1-0.25 => occurrence E
- Alea sismique < 0.1 => EI non retenu dans l'analyse de risque.

A titre d'information, pour le parc EDF, on constate :

- L'absence de remblais hydraulique.
- Aucun ouvrage construit à cheval sur une faille active.

- Des PGA modérés en général inférieurs à 0.3 g. Cependant, des amplifications sont possibles par la stratigraphie du sol de fondation conduisant à des accélérations en pied d'ouvrage parfois supérieures à 0.5 g.

A contrario et à l'instar des barrages béton, de nombreux ouvrages, de par leur conception ou leur comportement singulier, nécessitent des approches plus complexes. Par exemple :

- Des remblais homogènes présentant le risque de présence d'horizon liquéfiable ou a minima pouvant présenter des augmentations de pressions interstitielles significatives.
- Des ouvrages en remblai avec des fruits plus raides que les pratiques usuelles.
- Des ouvrages à conception atypique (par exemple certains barrages en enrochement à masque amont avec des pentes très raides, des crêtes très peu larges)
- Des ouvrages en remblai pouvant subir des agressions extérieures par leur environnement, comme par exemple la présence de glissement surplombant la retenue pouvant être déclenché par le séisme et générer une vague dangereuse pour le barrage

6. ANALYSE DU RISQUE SISMIQUE DES VANNES

L'article de Graveleine et al. (2024) [27], aborde le comportement sismique des vannes de barrage et leurs capacités à résister aux séismes, notamment dans des régions à sismicité faible à modérée comme la France. La publication fait un bilan des recherches et des expériences accumulées pour étudier comment ces équipements hydrauliques réagissent aux séismes, en mettant en lumière les limites des méthodes de calcul actuelles, souvent trop conservatrices, et les bénéfices d'un retour d'expérience (REX) basé sur des observations pratiques.

Bien que la France soit modérément sismique, les vannes y sont souvent similaires, en termes de conception et de matériaux, à celles des pays à forte sismicité. Le retour d'expérience mondial indique que, dans la majorité des cas, les vannes résistent bien aux tremblements de terre sans présenter de défaillances structurelles majeures. Ce constat soulève des questions sur la pertinence des méthodes de calcul qui estiment des charges sismiques parfois excessives, non corroborées par des observations pratiques.

Des études menées par EDF et d'autres partenaires montrent que les incidents impliquant des vannes lors de séismes de grande magnitude sont rares. Par exemple, lors de séismes majeurs en Turquie et au Japon en 2023 et 2024, les installations hydrauliques dotées de vannes ont globalement bien résisté, sans nécessiter de vidanges d'urgence. Ces résultats, que l'on peut étendre aux autres séismes passés, indiquent que les équipements, conçus selon les règles usuelles de bonne pratique et de l'état de l'art, en bon état de maintenance, peuvent absorber des accélérations sismiques importantes sans subir de dommages graves, même en cas de secousses dépassant les seuils couramment envisagés en France.

Les observations montrent que les rares dommages observés sur les équipements de vannerie sont souvent causés par des facteurs environnementaux externes, comme les glissements de terrain ou les chutes de blocs, plutôt que par des défaillances structurelles des vannes elles-mêmes. Par exemple, lors du séisme de Chi-Chi en 1999 à Taïwan (magnitude 7,9), les vannes ont globalement bien résisté à l'exception de la passe à cheval sur la faille sismique.

L'article critique les méthodes de calcul sismique conventionnelles, telles que l'approche de Westergaard et de Zangar, qui tendent à surévaluer les charges dynamiques appliquées aux vannes. Ces méthodes, développées dans les années 1930 et 1950, étaient basées sur des hypothèses simplificatrices et peu de données observationnelles. À l'inverse, les techniques modernes de simulation numérique, qui incluent des interactions fluide-structure, ont démontré que les charges hydrodynamiques réelles sont souvent inférieures aux valeurs théoriques calculées, surtout pour les vannes partiellement immergées. Des écarts importants sont souvent relevés entre les simulations et

les résultats réels, confirmant que les modèles traditionnels tendent à surestimer les efforts appliqués en cas de séisme.

La conception des vannes permet également une certaine flexibilité, de sorte qu'elles peuvent encaisser des charges sismiques sans subir de ruptures. Les vannes sont construites en acier ductile, un matériau capable de résister aux forces sismiques sans déformation excessive. De plus, l'assemblage de certaines vannes intègre des dispositifs permettant un léger glissement, dissipant ainsi l'énergie sismique et réduisant la probabilité de rupture structurelle. Ces caractéristiques ne sont pas toujours prises en compte dans les approches de calcul, ce qui peut conduire à une estimation trop prudente de la vulnérabilité sismique.

Pour rendre l'évaluation sismique des vannes plus robuste et proportionnée, l'article propose de recentrer les méthodes de justification autour de l'observation in situ, en intégrant davantage le retour d'expérience dans les processus de validation. Ces éléments permettraient d'affiner la compréhension des charges réellement supportées par les vannes et ajuster les règles de conception en conséquence.

7. CONCLUSION

Le retour d'expérience mondiale montre la très faible sensibilité générale des barrages vis-à-vis du risque sismique. C'est ce que l'illustre le retour d'expérience détaillé de séismes récents à très forte intensité (Japon 2024, Turquie 2023) ou des séismes plus anciens.

En parallèle, depuis une trentaine d'année, les séismes sont devenus une des principales sources de catastrophe naturelle en termes de létalité mondiale. En effet, il reste de nombreuses infrastructures inadaptées et sensibles au risque sismique (bâtiments, ponts...) tandis que les sécheresses et inondations font beaucoup moins de victimes depuis une trentaine d'année. Bien que le nombre de victimes dues aux ruptures de barrage par séisme soit extrêmement inférieur aux autres contextes de rupture (crue notamment), il ressort que les efforts consacrés (ou parfois exigés) au risque sismique, par comparaison aux autres risques affectant les barrages, semblent surdimensionnés, en particulier dans une zone comme la France métropolitaine, faiblement à modérément sismique.

Dans le cadre des analyses de risque des études de danger, une approche proportionnée et raisonnée est proposée, vis-à-vis de ce risque pour la France métropolitaine, territoire faiblement à modérément sismique au regard d'autres zones du globe. Basé sur le retour d'expérience et l'observation, il est proposé de ré-équilibrer la part donnée au jugement d'expert et l'analyse qualitative et quantitative des vulnérabilités du barrage, par rapport à des approches calculatoires complexes, qu'il convient de réserver à quelques cas particuliers présentant des pathologies ou singularités avérées.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1956). *Magnitude and Energy of Earthquakes*.
- [2] Ambraseys, N.N. (1960). *On the seismic behaviour of earth dams*. Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Vol. I, pp. 331-354.
- [3] Seed, H.B., et al. (1969). *Analysis of Sheffield Dam Failure*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation.
- [4] Chopra, A.K., et al. (1973). *The Koyna earthquake and the damage to Koyna dam*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- [5] Seed, H.B., et al. (1977). *The performance of earth dams during earthquakes*. Report No. UCB/EERC-77/20.
- [6] Hansen, K.D., & Roehm, L.H. (1979). *The Response of Concrete Dams to Earthquakes*. Water Power & Dam Construction, Vol. 31, No. 4, pp. 27-31.
- [7] ICOLD (1988). *Inspection of dams following earthquakes – Guidelines*. Bulletin 62.
- [8] Retamal, E., et al. (1995). *Le comportement des barrages en terre au Chili pendant le tremblement de terre de 1985*.
- [9] USCOLD (2000). *Observed Performance of Dams During Earthquakes – Volume II*.
- [10] S. Pells, R. Fell. (2002) *Damage and Cracking of Embankment Dams by Earthquakes and the Implications for Internal Erosion and Piping*. ICOLD.
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2005). *Guidelines for Seismic Performance Evaluation of Dams During Large Earthquakes*.
- [12] Hansen, K.D., & Nuss, L.K. (2011). *Lessons learned from the earthquake performance of concrete dams*. Water Power and Dam Construction Magazine, 27 September.
- [13] Nuss, L.K., et al. (2012). *Shaken, but not stirred: Earthquake performances of concrete dams*.
- [14] Pradel, D., et al. (2013). *Failure of the Fujinuma Dams during the March 11, 2011 Tohoku Earthquake*. Geo-Congress 2013.
- [15] USSD (2014). *Observed Performance of Dams During Earthquakes – Volume III*.
- [16] DGPR (2014). *Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques*.
- [17] USBR (2015). *Design Standards No. 13, Embankment Dams Chapter 13: Seismic Analysis and Design, Phase 4: Final*.
- [18] Valenzuela, P., et al. (2015). *Safety Performance of Dams in Chile's highly seismic environment*. 4th International Dam World Conference, Lisbon.
- [19] ICOLD (2019). *Bulletin 188: ICOLD Incident database - Bulletin 99 update - Statistical analysis of dam failures*. Preprint version.
- [20] Boulanger, R. (2019). *Nonlinear Dynamic Analyses of Austrian Dam in the 1989 Loma Prieta Earthquake*.
- [21] Adamo, N., et al. (2020). *Dam Safety and Earthquakes*. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 79-132.
- [22] Humbert, A. (2020). *Dams subjected to earthquakes – Harmonized feedback database across the globe*. 17th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE).

-
- [23] Hansen, K.D. (2022). *Seismic Safety Evaluation of Concrete Dams: An awakening to reality*. *Concrete International*, September, pp. 33-41.
- [24] Bremen, R. (2022). *Consequences on the design practices of worldwide dam accidents*. Proceedings of the 27th ICOLD Congress, Marseille, France.
- [25] AFPS (2023). *Rapport de la mission post-sismique des séismes de Turquie du 6 février 2023*. Septembre.
- [26] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2024). *État du barrage lors du tremblement de terre de la péninsule de Noto en 2020*. 23 janvier.
- [27] Graveleine, F., et al. (2024). *Vannes de barrage et séismes : éléments de l'état de l'art et perspectives pour la France et les pays faiblement à modérément sismiques*. Actes du colloque du CFBR, juin.
- [28] AFPS (2024). *Rapport de la mission post-sismique du séisme du 1er janvier 2024 de Noto (Japon)*. Septembre.
- [29] Hariri-Ardebil, M. (2024). *Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring*. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- [30] Cetin, K.O. (2024). *Performance of hydraulic structures during the 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence*. *Earthquake Spectra*.
- [31] USGS (2024). *Earthquake Catalog*. Accessible at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- [32] ISC (2024). *Extension of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue – June 2024 version*. Accessible at: <https://www.isc.ac.uk/iscgem/overview.php>.