

VANNES DE BARRAGE ET SEISMES : ELEMENTS DE L'ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES POUR LA FRANCE ET LES PAYS FAIBLEMENT A MODEREMENT SISMIQUES

Dam gates and earthquakes: state of the art and prospects for France and low to moderately seismic countries

David GRAVELEINE, Renaud POLLIER

EDF HYDRO – CIH Direction Technique, EDF HYDRO – Direction de la stratégie industrielle et du développement
david.graveleine@edf.fr ; renaud.pollier@edf.fr

Luc BOULAT, Sylvain CUBY

CNR - Direction de la Maintenance, CNR - Direction de l'Ingénierie
L.BOULAT@cnr.tm.fr ; S.CUBY@cnr.tm.fr

MOTS CLEFS

Vanne de barrage, séisme, analyse par le retour d'expérience, WESTERGAARD, ZANGAR,

KEY WORDS

Dam gate, earthquake, feedback analysis, WESTERGAARD, ZANGAR

RÉSUMÉ

Le constat globalement favorable et positif vis-à-vis de la capacité des vannes de barrage à bien supporter un séisme faible à modéré, doit encore être objectivé, travaillé, et consolidé pour le rendre robuste. C'est pourquoi l'article propose de remettre l'observation au cœur des méthodes de justification. Ces éléments observationnels serviront de socle pour revisiter si nécessaire les règles de dimensionnement et de conception applicables aux vannes, en France, afin que ces règles soient toujours placées du côté de la sécurité, mais sans pour autant être exagérément conservatives, qu'elles soient proportionnées et adaptées en fonction des cas. La simplicité des méthodes (qui conduit à une robustesse de mise en œuvre) doit être aussi un axe de travail fort à terme. Le retour d'expérience étant globalement favorable au bon comportement des vannes de barrage au séisme, et pour consolider les premiers constats, il est proposé à la profession de prendre le temps d'organiser un programme de travail plus approfondi à partir : du REX, des exigences réglementaires, des impératifs de priorisation industriels et du retour des analyses de risques (Etudes De Dangers notamment), en proportionnant les actions et les exigences aux enjeux.

ABSTRACT

The generally favorable and positive assessment of the ability of dam gates to withstand a weak to moderate earthquake still needs to be objectivized, worked on and consolidated to make it robust. This is why the article proposes putting observation back at the heart of justification methods. These observational elements will serve as a basis for revisiting, if necessary, the sizing and design rules applicable to gates in France, so that these rules are always placed on the side of safety, but without being excessively conservative, and so that they are proportionate and adapted to each case. The simplicity of the methods (which leads to robust implementation) should also be a major focus of work in the long term. As feedback from experience is generally favorable to the good behavior of dam gates against earthquakes, and in order to consolidate the initial findings, it is proposed that the industry take the time to organize a more in-depth work program based on : feedback from experience, regulatory requirements, industrial prioritization imperatives and feedback from risk analyses (particularly hazard studies), with actions and requirements proportionate to the issues at stake.

1. PREAMBULE

Cet article est largement inspiré du travail collectif initié lors de la préparation d'un possible Projet National Barrages et Séismes, partie Vannes et Contrôle-Commande, sous le pilotage de l'IREX^(*), entre 2014 et 2016. Les gestionnaires ou exploitants de grands barrages^(**) étant dans l'obligation depuis 2018 en France de justifier qu'un évènement naturel exceptionnel comme le séisme « ne conduit pas à une libération incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue » (voir [1]), il est apparu opportun de profiter du colloque CFBR Vantellerie et Contrôle-Commande 2024 pour refaire un point sur l'état de l'art dans le domaine de la justification du comportement des vannes de barrage vis-à-vis de l'aléa séismique, en s'appuyant sur le travail réalisé entre 2014 et 2016, et en l'actualisant.

A travers cette publication, il s'agit de (re)mettre en lumière succinctement les forces et les faiblesses des méthodes de justification appliquées aux vannes, de remettre l'observation au cœur des exigences et des méthodes, de proposer d'utiliser les moyens modernes de mesures in-situ (mesures embarquées avec capteurs piézométriques, accéléromètres classiques ou MEMS, vélocimètres jauges, hydrophones, etc.) et voir en quoi ces mesures pourraient contribuer à la consolidation et au « juste niveau » - i.e. proportionné aux enjeux - des méthodes de calcul, d'ouvrir la possibilité de recourir à des méthodes de justification complémentaires aux méthodes « historiques purement calculatoires ». Il s'agit également de s'interroger sur le niveau d'exigences à avoir vis-à-vis de la prise en compte de cet aléa naturel et les manières d'y répondre, dans un pays modérément sismique comme la France métropolitaine, pour des équipements industriels comme les vannes^(***) dont le comportement structurel est globalement plutôt rassurant lorsque l'on analyse le retour d'expérience mondial, du fait notamment d'une aptitude certaine à supporter durablement de fortes charges sans déformations excessives.

Outre le travail réalisé par les rédacteurs, cet article est donc aussi le fruit d'un travail collectif auquel ont participé entre 2014 et 2016, de manière directe ou indirecte, les partenaires suivants, par ordre alphabétique : ACOEM, ARTELIA-SPRETEC, AVNIR Energy, CEGELEC, CNR, EDF HYDRO, GENERAL-ELECTRIC, INSA-LYON, JOSEPH PARIS, OPTIFLUIDES, TRACTEBEL- Engineering, VIBRATEC.

(*) : Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil.

(**) : Exigences applicables aux barrages classés A et B en zones sismiques 3 à 5, aux barrages de classe C reconstruits ou réhabilités en zones 4 et 5, aux barrages créés et barrages de classe A et B reconstruits - ATB [1]

(***) : par vannes il est entendu les structures charpentées métalliques qui font les bouchures des barrages. Il est également entendu les portes d'écluses et tout autre équipement de vantellerie équipant les canaux et voies navigables.

2. ELEMENTS DE COMPREHENSION ET ENONCE DU PROBLEME

2.1. Les exigences françaises et le REX mondial.

La réglementation sismique française s'appliquant aux vannes des grands barrages s'est renforcée depuis 2018 [1]. **La France métropolitaine n'étant pas, comparativement à d'autres pays du monde (comme la Chine, l'Iran, le Japon, la Californie, la Turquie, l'Inde), un pays fortement sismique, et les équipements de vantellerie exploités en France étant pourtant comparables « au premier ordre » (conception, formes, matériaux, masses, inerties, dispositions de conception) à ceux exploités dans ces pays fortement sismiques, il est légitime de s'interroger en quoi cette situation exceptionnelle d'exploitation est réellement dimensionnante pour les vannes exploitées en France métropolitaine, et quels sont les risques encourus. Ce questionnement prend d'autant plus de sens que le retour d'expérience post-sismique ne semble pas mettre en lumière de désordre structurel majeur évident sur les vannes (rupture franche), y compris pour les équipements un peu anciens.** La volonté de répondre à ces exigences de la manière la plus proportionnée et adaptée possible aux enjeux, pour les vannes existantes comme pour les vannes neuves, nécessite d'avoir une compréhension fine des sollicitations sismiques qui leur sont réellement appliquées et des risques encourus.

Le cas des vannes implantées sur les vidanges de fond des grands barrages en est un exemple typique : en appliquant des méthodes de vérification « usuelles », ces vannes seraient susceptibles d'être exposées théoriquement à des charges sismiques extrêmement élevées, parfois largement au-delà des charges retenues pour leur dimensionnement. Or la collecte du retour d'expérience des vannes ayant été confrontées à ces événements naturels exceptionnels ne corrobore pas ces résultats. Par exemple, une analyse réalisée par EDF et non publiée en 2019 a visé à collecter le retour d'expérience international disponible dans ce domaine sur toutes les sources d'information disponibles et « ouvertes au public ». Cette synthèse bibliographique menée sur environ 250 sources d'informations a montré que sur la base des informations disponibles aucun aménagement n'a eu à subir une vidange du fait d'un endommagement majeur direct d'une vanne. L'analyse fait notamment ressortir les éléments suivants :

- Étant donné le nombre élevé de séismes s'étant déjà produits dans le monde et le nombre de barrages construits, y compris dans des zones de forte sismicité, les impacts sur les barrages, et en particulier sur les équipements de vantellerie peuvent être qualifiés de faibles ;
- Un certain nombre de cas analysés concernent des aménagements vannés ayant subi de gros séismes (magnitude > 8), et pour lesquels les articles ne mentionnent ni des dommages sur la vidange de fond ni une vidange de la retenue ;
- Les dégâts structurels sur les ouvrages et équipements sont toujours la conséquence de gros séismes (magnitude > 7) - *ne sont pas considérés dans cette affirmation les problèmes d'alimentation électrique par exemple* - ;
- Les désordres ont toujours pour origine l'environnement proche de l'équipement (mouvements de l'infrastructure génie-civil, problème sur les pièces fixes, projectiles ou élément agresseur externe, perte d'alimentation) ;
- Il n'est pas fait mention de « rupture directe » d'organes de vantellerie (Figure 1) ;
- Aucune vidange de retenue (volontaire ou subie), n'est répertoriée dans les documents analysés, des suites d'une rupture d'un organe de vantellerie.



Figure 1 : Le séisme de Chi-Chi (1999 Mw = 7.9) à Taïwan détruit plusieurs passes du barrage de Shih-Kang par rejet de faille et tassements différentiels des passes du barrage en rivière. Les vannes (mais pas les passes) ont plutôt bien résisté à l'évènement.

Dans un souci de complétude, il faut noter que :

- Il n'a pas été possible de se procurer l'intégralité des documents d'exploitation sur tous les évènements étudiés notamment en Iran, Nouvelle-Zélande, ou en Chine ;
- Il existe certainement des cas d'ouvrages soumis à des séismes (avec des désordres ou non) pour lesquels les rapports d'inspections ne sont pas disponibles à l'externe ;
- Les états des lieux après séisme sont généralement principalement orientés sous l'angle génie-civil (stabilité de l'ouvrage, fissurations, fuites, ...), les informations sur les matériels présents sur le barrage ne sont pas systématiquement renseignées. Pour autant on peut penser que si des dommages notables avaient été subit (on parle ici d'intégrité des structures), il en aurait été fait mention. Le REX positif est donc très rarement répertorié ou caractérisé ;
- Les séismes analysés ou leurs conséquences ont eu parfois un impact peu significatif sur les équipements, généralement en termes de manœuvrabilité ou d'accessibilité aux équipements.

Les informations explicitement collectées plus récemment par l'A.F.P.S. (Association Française du Génie Parasismique) lors des séismes de février 2023 au sud de la Turquie [2] ou de janvier 2024 dans la péninsule du Noto au Japon [4], corroborent l'étude bibliographique de 2019. Par exemple, pour ce qui concerne le premier séisme cité, il est mentionné dans le rapport [3] : « En second lieu, grâce à la bienveillance des exploitants de barrages, six ouvrages ont pu être visités. On peut citer les barrages de Berke, d'Aslantas, de Ceyhan, de Kalacik, d'Ariklikass et de Menzelet/Kilavuzlu ainsi que l'ensemble des équipements associés nécessaires à la production hydroélectrique. La typologie des barrages visités était variée, principalement voûte, poids et en remblai. D'une manière générale, les barrages voûtes se sont bien comportés ainsi que les équipements associés. En revanche, il a été observé que certains barrages en remblai (notamment en terre avec noyau d'argile) ont été endommagés de manière notable. Notons qu'aucun relâchement d'eau non souhaité depuis la retenue n'a été rapporté ».

Tous ces grands barrages, vannés, n'étaient certes pas tous remplis à leur pleine capacité au moment de cet évènement majeur, mais enfin, les matériels en charge ou partiellement en charge qui les équipent ont supporté sans dommage apparent la sismicité importante (un nombre conséquent d'ouvrages majeurs sont situés dans un rayon de moins de 100 km autour des épicentres des deux séismes de magnitudes 7,5 et 7,8, avec des dizaines d'ouvrages situés dans des zones où les PGA estimés sont compris entre 0,1g et 0,2g). Et aucun de ces ouvrages n'a dû être vidangé du fait d'une rupture de leur vidange de fond. On ignore le chargement sismique réel que ces équipements ont vu, du fait de l'absence d'enregistrement in-situ notamment. Mais des estimations ont été faites et donnent des valeurs d'accélération au sol remarquables de par leurs intensités, supérieures à 0,2g en PGA (Peak Ground Accélération – accélération maximal au niveau du sol) pour Kalecik/Ariklikas/Berké/Aslantas et supérieures 0,5g en PGA pour Yarseli (source interne Géodynamique et Structure / EDF CIH) :

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

Tableau 1 : séismes de février 2023 au sud de la Turquie, estimation des valeurs d'accélération au sol à proximité de grands ouvrages hydrauliques Turcs, PGA Nord/sud (NS) Est-Ouest (EW) et verticaux (UD) (d'après [3]).

Afin de compléter ces observations, il reste nécessaire de collecter les données de conception et de réalisation des vannes équipant ces ouvrages, qui sont des ouvrages plutôt récents (< 40 ans, moyenne d'âge des 100 ouvrages dans un rayon de 100 km autour des deux épicentres : 20 ans).

Concernant le séisme de janvier 2024 sur la péninsule du Noto, les accélérations maximales subies par certains ouvrages sont de l'ordre de 4 fois supérieures aux accélérations maximales applicables en France en zone 4 (PGA = 0,3g). La collecte du retour d'expérience post-sismique au Japon est en cours par l'A.F.P.S. et les équipes d'EDF CIH au moment de la rédaction de cet article, mais aucun ouvrage retenant de l'eau ne semble avoir nécessité de vidange complète ou n'a été vidangé du fait d'une rupture d'un organe de vannerie. A priori la cote du barrage d'Oya Dam a dû être baissée, mais pour une raison non identifiée et non liée aux équipements (à confirmer lors des investigations complémentaires).

Pour compléter l'argumentation, la publication [5] montre que les vannes charpentées en exploitation au Japon n'ont pas des caractéristiques (matériaux, masses, inerties, dispositions de construction) significativement différentes de celles des vannes exploitées en France ; même si des écarts existent (contraintes admissibles plus faibles au Japon de l'ordre de 10% à 20% notamment), ils ne sont pas en rapport avec l'écart de sismicité entre les deux pays.

2.2. Un juste référentiel solide et commun qui reste malgré tout à construire pour les vannes

Ces observations sur le retour d'expérience mondial questionnent le degré de conservatisme des règles de calcul parfois mises en œuvre, sachant qu'aucun document guide de la profession ne fixe les chargements sismiques à considérer et les méthodes de calcul à appliquer pour les vannes ; il est tout au mieux demandé de prendre en compte, si nécessaire, le séisme sans dire comment faire, comme c'est le cas dans la norme qui fait référence au niveau international pour le dimensionnement des vannes charpentées (voir [7]) ou dans les Eurocodes plus adaptés aux structures charpentées en air (voir [8]). Et les publications faites dans le domaine ne mettent pas en avant autre chose que la complexité du sujet (voir [11] et [12]). Et parfois lorsqu'une méthode est recommandée, comme par exemple dans les règles éditées par l'USACE (voir [9]), il s'agit d'une méthode simplifiée, ancienne et mal adaptée au cas des vannes, qui n'ont pas par exemple un comportement infiniment rigide aux fréquences d'un séisme, notamment lorsqu'elles sont en charge (voir [6]). Et ces méthodes simplifiées sont d'ailleurs bien reconnues comme très approximatives, comme le montre [11] : « *Special attention is given in the report to Westergaard's approach, the most commonly used method used by the industry. Results from exact and simplified Westergaard's methods are compared. The comparison shows that the simplified Westergaard method significantly overestimates the hydrodynamic load on the top part of the dam (where spillway gates usually are located) when compared with the exact solution (...). The assumption of a vertical plane upstream face and rigid model of the dam in the Westergaard formula (used for analysis of the spillway gate) is not valid for radial gates ... and should be used only in preliminary assessments* ». On notera que ces formules (on parle ici de l'approche de Westergaard [15] ou de Zangar [16]) ont été mises au point à une époque (1933 pour la première, 1952 pour la seconde) où la science et les connaissances étaient toutes autres de celles d'aujourd'hui, et surtout aussi à une époque où les observations des phénomènes physiques in-situ étaient bien plus difficiles qu'aujourd'hui (évolutions de l'instrumentation et des acquisitions embarquées, nombre d'aménagements en service en zone sismique, etc.), obligeant à proposer des méthodes approchées, empreintes d'hypothèses fortes dont on peut se demander si leur champs d'application n'est pas inadapté (cas des équipements implantés en crête de grands ouvrages par exemple)....

En 2024, il est légitime de s'interroger sur les raisons du faible nombre de publications de confrontation entre les observations et les mesures in-situ avec ces méthodes « historiques » pour en évaluer le degré de conservatisme (ou non). M. J. W. Salamon semble l'un des plus actifs en termes d'études et d'analyses dans la profession sur le sujet.

Pour illustrer les écarts de la prise en compte des phénomènes physiques entre la formulation proposée par Westergaard, et des outils de simulation numérique plus récents, un travail a été réalisé en 2015 entre EDF CIH et ARTELIA-SPRETEC (cf. Tableau 2). Ce travail s'est employé à quantifier les écarts entre les masses d'eau entraînées estimées par la méthode de Westergaard et une modélisation par éléments finis avec interaction fluide-structure, pour des cas simples et génériques (vanne plate et rigide en canal, vanne plate souple en canal, vanne plate souple de réservoir ou canal de même hauteur que la retenue, etc.). Des écarts significatifs sont relevés, et sont variables suivant les cas :

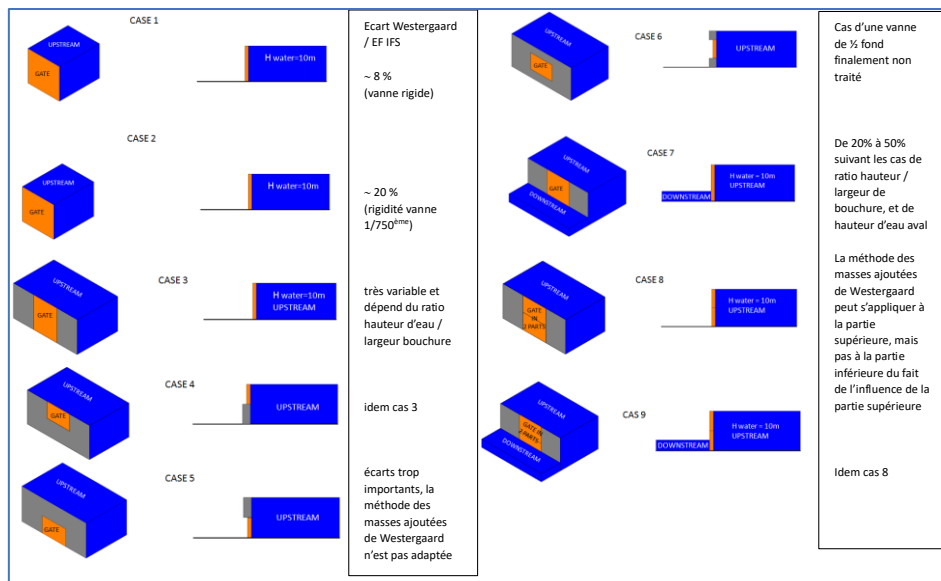


Tableau 2 : comparaison du comportement dynamique des vannes plates au séisme (Réf. EDF Hydro / Artélia-Spretec)

En complément, EDF CIH mène depuis une dizaine d'années avec ses partenaires académique (INSA LYON Laboratoire de Vibration Acoustique) et industriel (OPTIFLUIDES) un travail de caractérisation des charges hydrodynamiques susceptibles de solliciter les vannes en extrémité de long conduits immergés. Ce travail a fait l'objet de nombreux rapports académiques et d'une thèse soutenue en 2022 ; le travail est toujours en cours et les principaux résultats seront vraisemblablement publiés d'ici un à deux ans.

D'autre part, on notera que le travail réalisé par le groupe de travail piloté par le MEDDTL- DGPR (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement – Direction générale de la prévention des risques) en 2014, après environ quatre années de travail, qui a conduit à la publication de recommandations en matière de risque sismique et de sécurité des ouvrages hydrauliques, n'est pas suffisamment détaillé et explicite pour ce qui concerne les *ouvrages annexes* (i.e. les vannes) pour être adapté à leur justification (voir [10]). Il s'agit là du point de vue des rédacteurs du présent article.

Les points de difficultés identifiés par les acteurs du domaine hydromécanique pour évaluer la tenue des vannes au séisme sont :

- La diversité du parc d'équipements en exploitation en France, aussi bien en termes de types de vannes, que de configurations d'implantation, de modes d'exploitation, d'âge et de période de construction (qui s'étale de 0 à presque 100 ans pour certaines vannes) etc. ;
- La difficulté d'apprécier l'interaction avec le « support » sur lequel les vannes sont implantées (le barrage) : nature des interfaces, évaluation des sollicitations transmises à la fondation et de l'ouvrage à l'équipement, influence de l'eau sur le barrage et l'équipement,
- La difficulté d'apprécier l'influence de l'eau sur des structures partiellement immergées (face amont en eau, face aval en air ou partiellement immergée suivant les cas),
- La difficulté à apprécier l'influence des interfaces dans les éventuels phénomènes dissipatifs (jeux, étanchéités, mouvements possibles) qui induit des non-linéarités comportementales difficiles à prendre en compte ;
- La difficulté de caractériser et prendre en compte les amortissements et phénomènes dissipatifs,
- Le comportement multi-modal aux fréquences sismiques où le contenu énergétique est le plus fort (0 - 30 Hz).

Historiquement le travail sur tous ces sujets s'est d'abord concentré sur les barrages, et finalement peu sur les vannes, du fait de la priorisation des enjeux, et probablement du bon comportement global des vannes, au regard du REX mondial.

L'ensemble de ces difficultés sur les méthodes de calcul pour les vannes est bien synthétisé dans l'ouvrage édité par le PIANC (voir [12]), y compris sur la problématique de la caractérisation de l'action sismique en elle-même (propagation dans le sol, transmission aux structures porteuses), puis son action sur les structures hydromécaniques (vannes, portes d'écluses) : « *modelling of hydrodynamic pressure is complicated and obtaining a reasonably accurate representation can be difficult* ». Ce rapport expose bien les diverses méthodes qu'il est possible de mettre en œuvre et leurs limites, mais ne quantifie pas les marges contenues dans ces méthodes, ne présente pas le retour d'expérience et, à la fin, il est finalement difficile de choisir une méthode à appliquer et d'en évaluer l'(es) éventuel(s) conservatisme(s). Mais cet ouvrage, comme beaucoup d'autres sur le sujet d'ailleurs, ne stipule pas explicitement pour les chargements à considérer la part de la surcharge provenant de la retenue (onde de surpression arrivant de l'amont du fait de l'excitation sismique de ses berges) de celle provenant des appuis de la vanne (mouvements imposés par le barrage à la vanne du fait de l'excitation sismique des fondations du barrage).

L'exploration des marges de dimensionnement des équipements, notamment vis-à-vis du séisme, conduit donc à questionner les méthodes de modélisation et de dimensionnement utilisées. Des écarts significatifs sont mis en évidence entre le comportement réellement observé sur des ouvrages soumis à de fortes sollicitations sismiques et les résultats des modélisations numériques. Il n'est en effet pas rare qu'en appliquant les méthodes de calcul « historiques » ou même les plus « avancées » à date (analyse modale-spectrale avec interaction fluide-structure de la vanne seule ou de la vanne + barrage) on aboutisse à une charge statique plus sismique supérieure à deux fois la charge de dimensionnement de la vanne, voire bien plus lorsqu'on s'intéresse à des équipements implantés en crête d'ouvrages relativement hauts. Et ces résultats ne sont pas cohérents avec les observations du REX des équipements implantés dans des zones fortement sismiques. Dans ce contexte, **les ambitions que portait le Projet National Barrages et Séismes en 2016, à savoir de mieux évaluer ces marges dans les méthodes de dimensionnement en s'appuyant sur l'amélioration de la formalisation du retour d'expérience post-sismique, restent d'actualité pour l'ensemble de la profession : remettre la physique et l'observation au cœur des méthodes de justification, d'autant plus que contrairement au milieu du siècle dernier, le nombre d'aménagements observables ainsi que les sciences de la mesure ont considérablement évolués depuis !**

3. PREMIERS ELEMENTS D'EXPLICATION DU REX POSITIF

Une des explications que l'on peut avancer pour justifier le relatif bon comportement des vannes de barrage au séisme provient sûrement des exigences de fonctionnement que doivent remplir ces équipements dans toutes les situations d'exploitation les plus courantes. Ces exigences sont fortes, et de manière générale, elles sont les mêmes quels que soient les pays. On peut parler d'un « **socle d'exigences fonctionnelles communes** », **la physique et les performances fonctionnelles (manœuvrabilité, rigidité, étanchéité, durabilité, maintenabilité, etc.) étant les mêmes partout quels que soient les pays et leur sismicité**. Et ce sont ces exigences fonctionnelles en situations normales ou dégradées (fonctionnement en l'absence d'énergie, réserve de marge dans les actionneurs, redondance de certaines fonctions, maintien en position sur un seul côté, etc.) qui font en général l'essentiel des paramètres influant la conception et le dimensionnement de ces structures si particulières, aptes à fonctionner quotidiennement sous de fortes charges, pendant de nombreuses années (70 à 100 ans) et ce, quelles que soient les conditions d'exploitation ou presque. La gestion de l'eau par ces équipements, l'été, l'hiver, en crue ou non, avec ou sans dépôts, en surverse ou en

sousverse sont autant de situations qui rendent **les vannes particulièrement aptes à supporter de fortes charges tout en répondant à des exigences fonctionnelles élevées (faibles déformations notamment) qui limitent les taux de sollicitations (contraintes) dans ces structures.**

Également, **la nature des matériaux utilisés, généralement des aciers ductiles dont les caractéristiques mécaniques et les épaisseurs sont généralement légèrement supérieures à celles considérées, permet aussi d'encaisser des surcroûts d'efforts sans rompre, pour des situations accidentelles de chargement par exemple** (hors problématique d'instabilité élastique bien entendu). La mise en œuvre d'assemblages autorisant le glissement ou présentant des jeux susceptibles de se combler, aux états limites ultimes, est aussi de nature à dissiper de l'énergie et à permettre à la structure d'encaisser un surcroît d'effort sans rompre. Ces aspects ne sont que peu voire pas mis en avant dans les règles de calcul généralement mises en œuvre pour la vérification de la tenue mécanique des vannes.

Concernant les méthodes de calcul, assimiler un séisme à un chargement type « force imposée » et étudier un équilibre statique est un conservatisme fort. Si la réponse dynamique de la structure est bien prise en compte dans les analyses modale-spectrales, le caractère transitoire et les effets cycliques de la sollicitation ne sont pas pris en compte. Lorsqu'on s'intéresse à la capacité ultime de la structure vis-à-vis du séisme, cette méthode peut ne plus être pertinente, et **la ductilité de la structure, c'est-à-dire sa capacité à se déformer au-delà de sa capacité élastique, peut être une des explications de la différence entre les résultats des études calculatoires « courantes » et le REX post-sismique.** Certaines méthodes proposent d'employer un « *facteur de ductilité* » ou un « *facteur d'absorption d'énergie inélastique* » ou encore un « *coefficient de comportement* » pour traduire simplement ce comportement ; de telles approches n'ont pas encore été appliquées aux vannes mais pourraient l'être ; elles sont proposées dans l'ingénierie nucléaire par exemple.

Il est ainsi légitime de penser que les choix de matériaux, la capacité de ces structures à encaisser un surcroît d'effort de la nature (temporelle) de celle d'un séisme par « adaptation » ou « accommodations locales », ainsi que le « *socle d'exigences communes* » font que les vannes disposent intrinsèquement d'une certaine marge de résistance structurelle et d'une aptitude à encaisser les efforts, et que cela couvre vraisemblablement pour bonne partie les exigences qu'il est réellement nécessaire de mettre en œuvre vis-à-vis des sollicitations sismiques exceptionnelles vues par les vannes, et notamment dans les pays faiblement ou modérément sismiques, même si les règles de calcul usuelles ne le mettent pas bien en lumière.

L'autre partie de l'explication se trouve aussi très probablement dans le fait que pour les séismes modérés à forts il est plausible que des phénomènes de dissipations d'énergie existent (jeux, non linéarités géométriques et/ou de comportement, déformations locales minimales, glissement, etc.) et limitent le chargement (intensité) réellement appliqué aux vannes, et les découplent aussi du sol et du barrage sur lequel elles sont implantées. Ces phénomènes ne sont généralement pas pris en compte dans les règles de calcul actuelles, notamment du fait de la complexité de mise en œuvre que cela nécessite.

Il est évident que pour que ce retour d'expérience et cette argumentation soient recevables, les vannes et leur environnement doivent avoir été conçus et réalisés selon des standards reconnus, et être dans un bon état d'entretien, de conservation et de fonctionnement au moment de la survenue de l'évènement sismique.

4. L'INTEGRITE STRUCTURELLE, MAIS AUSSI L'OPERABILITE POUR CERTAINS CAS...

Enfin, si les approches par calculs sont historiquement un axe de travail important pour évaluer l'intégrité des vannes, elles n'en sont pas moins qu'un des éléments à considérer pour ce qui concerne l'opérabilité post-séisme. Pour cette dernière, les analyses doivent être élargies : accessibilité au site, aux vannes, risques liés à l'environnement, redondance des sources d'énergie, jeux fonctionnels résiduels, Cependant en France, pour les grands barrages, l'opérabilité post événement naturel fait déjà l'objet de dispositions organisationnelles et constructives fortes : visites et essais post-séisme immédiats, consignes d'exploitation en situation dégradée, redondance des systèmes d'alimentation, ultime secours pour certaines catégories de vannes assurant des fonctions de sûreté comme les évacuateurs de crue, etc.

A titre d'illustrations, le séisme du Wenchuan (2008 Mw = 7.9) en Chine provoque une chute de blocs à Taipingyi qui sectionne le vérin de la vanne (Figures 3 et 5, suivant publication de M. M. WIELAND dans Water Power, aspects equipment and components of HPPs Feb 2013) ou bloque partiellement l'évacuateur de crue par écroulement rocheux (Figure 2 guide DGPR 2014), ou engendre des difficultés d'accès aux équipements (Figure 4).



Figure 2 : Eboulement rocheux devant l'évacuateur



Figure 3 : vérin avant le séisme



Figure 4 : route d'accès au barrage détruite



Figure 5 : Vérin coupé par une chute de bloc

5. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cet article est d'apporter un éclairage afin que le sujet du comportement sismique des vannes de barrage puisse être apprécié et traité à son juste niveau, pour la France et les pays faiblement à modérément sismiques. **Le constat, globalement favorable et positif vis-à-vis de la capacité des vannes de barrage à bien supporter un séisme faible à modéré, doit encore être objectivé, travaillé, et consolidé pour le rendre robuste. C'est pourquoi l'article propose de remettre l'observation au cœur des méthodes de justification.** Les méthodes pour l'essentiel calculatoires pourraient être utilement complétées par des méthodes observationnelles comme par exemples les justifications par le retour d'expérience (voir la fiche type de collecte d'informations mise au point par EDF CIH et GEODYNAMIQUE ET STRUCTURE en annexe). L'article met également l'accent sur le fait que la problématique sismique ne doit pas être abordée sous le seul angle du calcul de la résistance mécanique et de la vérification de l'intégrité des structures, cette affirmation étant aussi guidée par l'observation post-sismique.

Une des principales voies de travail, et jugée prioritaire, serait donc **la formalisation et valorisation du retour d'expérience post-sismique**, notamment international, car la France métropolitaine étant un pays « faiblement sismique » comparativement à d'autres il est nécessaire d'aller chercher ces informations là où elles se trouvent, et notamment dans les pays situés en bord de plaque tectonique qui rassemblent la grande majorité du retour d'expérience mondial. Il est proposé d'explorer, collecter, classer, analyser et objectiver ce retour d'expérience sur le comportement réel des vannes au séisme et les chargements auxquels elles ont été réellement exposées ; identifier les équipements ou les sous-ensembles qui se sont bien comportés (et cela n'est que trop rarement mis en valeur) et ceux qui ont posé problème. **Les missions post-sismique telles que celles menées par l'A.F.P.S. ou la profession (C.I.G.B.), ainsi que les enregistrements in-situ sont de bonnes voies de travail à valoriser.** Et comme le stipule la référence [13], la source d'informations existe mais n'est pas suffisamment exploitée : « *More than 23,000 dams subjected to significant earthquakes are identified. This feedback is translated in a ground motion metric and shows that the available feedback is far higher than that which is published. For example, the number of dams shaken by more than 0.2g should be higher than 2,000* ». Et toujours selon cette même référence, l'intérêt de collecter et de valoriser ce retour d'expérience est essentiel à l'élaboration de méthodes de dimensionnement robustes et proportionnées pour les barrages, et ce qui est également vrai pour les vannes : « *... it will not be possible to perform good seismic study of dams without a good knowledge of the past behavior and the mode of failure observed (or not) during earthquakes* ».

Ces éléments observationnels serviront de socle pour revisiter si nécessaire les règles de dimensionnement et de conception applicables aux vannes, en France, afin que ces règles soient toujours placées du côté de la sécurité, mais sans pour autant être exagérément conservatives, qu'elles soient proportionnées et adaptées en fonction des cas. La simplicité des méthodes (qui conduit à une robustesse de mise en œuvre) doit être aussi un axe de travail fort à terme.

On le voit, les approches calculatoires, bien qu'elles représentent un axe de travail fort et indispensable, ne sont pas la seule réponse à la problématique, et n'en sont qu'un élément. En s'appuyant sur l'analyse du retour d'expérience mondial il pourra être fixé comme objectif de caractériser la résilience des barrages et des vannes, d'identifier les cas de faiblesses avant qu'ils ne soient sollicités par le séisme de référence. Il pourra être proposé de prioriser et de hiérarchiser les axes de travail, et le niveau de justification à adopter en fonction des situations, des enjeux (matrice probabilité d'occurrence / criticité des enjeux) et du niveau de sismicité (associé à une période de retour). Les analyses type Etudes De Dangers faites sur les barrages en sont une illustration.

Les orientations proposées dans cet article trouvent aussi un écho récent dans le domaine de la justification des ouvrages génie-civil, au travers la référence [17], qui propose de « *s'appuyer sur les données statistiques disponibles concernant la rupture des barrages pour identifier les orientations principales qui permettent de réduire la probabilité de rupture des barrages existants et des nouvelles structures. Les informations statistiques sont à combiner avec les caractéristiques spécifiques de chaque ouvrage afin de mieux évaluer les risques associés. Cette approche est proposée afin de réorienter les priorités actuelles dans le domaine de l'analyses de risques pour les ouvrages de retenue* ». L'auteur propose également le concept de *vulnérabilité*, plutôt que de *probabilité de rupture*, « *qui ne comporte pas une évaluation quantitative du risque mais permet de considérer les conséquences d'un évènement dépassant la limite considérée au niveau du projet* ».

En conclusion :

Comme montré dans les précédents chapitres, le retour d'expérience est globalement favorable, et il est possible d'affirmer que dans la grande majorité des cas, les enseignements tirés du REX permettent de conclure à un comportement satisfaisant des équipements vannés en bon état et bien conçus, dans le contexte sismique modéré en France métropolitaine.

Pour consolider ces conclusions, il est proposé à la profession de prendre le temps de mettre en place un programme de travail plus approfondi sur le moyen/long terme à partir : du REX, des exigences réglementaires, des impératifs de priorisation industriels et du retour des analyses de risques (Etudes De Dangers notamment), en proportionnant les actions et les exigences aux enjeux.

Exemple d'une fiche de collecte de retour d'expérience post-sismique pour un ouvrage et ses équipements (source : EDF CIH et Géodynamique et Structures)

Fiche de récolte de données sur les barrages en zone sismique						
Identification de l'aménagement		photo d'ensemble du barrage				
Pays						
Nom de l'ouvrage						
Fonction (électricité, irrigation, eau potable, ...)						
Type d'aménagement (capacitif, barrage mobile en rivière)						
Adresse						
Latitude						
Longitude						
Propriétaire/exploitant						
Année de construction						
Hauteur barrage						
Volume retenue						
Identification du séisme						
Référence (nom/date)						
Magnitude						
Distance épicerentre/barrage						
ShakeMap zone						
PGA (au pied du barrage) + source (estimée, calculée, mesurée)						
Récoltes de données		Réponse	Information (O,E,T)¹	Sources (VV, VP, RIC)²	Commentaires	
Visite : virtuelle ou sur site ?						
Date de la visite						
Caractéristiques de l'ouvrage						
Exploitation	Présence exploitant sur place en permanence?					
	Accès rapide possible suite au séisme?					
	Présence alimentations électriques de secours? Type?					
Génie-civil	Type de barrage (voûte, poids, remblai)					
	Si remblais, type (*)					
	Si barrage équipé de filtres, épaisseur?					
	Présence superstructures? Localisation?					
Régulation du niveau d'eau de la retenue (crue)	Dispositifs d'auscultation (pendules, piezzo, nivellement)?					
	Ouvrage d'évacuation des crues vanné ou non (seuil génie-civil "libre") ?					
	Si vannes : type (wagon, segment, clapet) et masse unitaire					
	Constructeur des équipements hydromécaniques ?					
	Type de construction des vannes (*)					
Vidange de l'aménagement	Position organes de manœuvre (piles, superstructure)					
	Type de motorisation (vérins, câbles, chaînes, auto)					
	L'ouvrage possède-t-il une vidange de fond?					
Conduit hydraulique principal (prise d'eau pour turbinage)	Entonnement : tour de prise dans la retenue ? en pied de barrage ? en berge / rive de la retenue ?					
	Type(s) de vanne(s) associé(es)					
	Type de prise d'eau : tour de prise d'eau dans la retenue ? prise d'eau sur le barrage ? prise d'eau en rive ?					
	Type de vanne(s) associée(s) à la prise d'eau					
Autre	Présence conduite forcée? Si oui, enterrée ou aérienne?					
	Y a-t-il présence d'une vanne de tête? Si oui de quel type?					
	Présence ouvrages/matériels autres (portiques, ...)					
	Présence de dispositions parasismiques spécifiques?					
REX post-sismique	Présence d'un dispositif de mesure du niveau sismique? (présence/position/mesures)					
	Cadre réglementaire lors de la construction?					
	Accélération sismique de dimensionnement?					
	Etat de l'ouvrage avant le séisme	Niveau retenue (/RN)				
		Vannes d'évacuation des crues en charge?				
		Vanne(s) batardeé(s)?				
		Maintenance/réparation en cours?				
	Etat de l'ouvrage suite au séisme	Si portique ou autre matériel : localisation				
		Domages observés sur l'environnement proche				
		Accessibilité à l'ouvrage : normale ? Difficile ?				
		Accessibilité aux équipements (vannes, locaux) : normale ? difficile ? impossible ?				
		Domages sur l'ouvrage (fissuration, brèches, etc.) et sur les matériels (chocs, coincement, rupture) ?				
		Présence d'agresseurs externe (chute de bloc, vague, chute d'équipement, etc.) pouvant endommager les équipements et l'ouvrage ou ses accès ? (photos)				
		Evolution des sous pressions dans les piézomètres ? Si oui, renseigner les valeurs				
		Abaissement de la retenue nécessaire? Si oui, raison?				
Mise en sécurité du barrage possible?						
Vidange du barrage possible?						
Alimentation électrique du barrage possible?						
Les vannes ont-elles été manœuvrées depuis?						
Des travaux ont-ils été réalisés depuis? Si oui type?						
Etat de l'ouvrage lors de la visite	Niveau de la retenue					
	Données auscultation disponibles ?					
	Les vannes sont-elles en charge?					
	Observe-t-on des fuites sur les vannes? De quel niveau?					
	Si turbines ou pompes : sont-elles en fonctionnement (débit observable à l'aval)					
Des débits passent-ils par les évacuateurs de crues le jour de la visite ? Si oui, photo						
Des travaux ont-ils été réalisés depuis? Type?						
¹	O=observé, E=estimé, T=témoignage					
²	VV=visite virtuelle, VP = visite physique, RIC=recherche internet croisée					
³	barrage en terre zoné à noyau, barrage à masque amont étanche en terre, barrage à masque amont étanche en enrochements, barrage en terre homogène					
⁴	treillis, PRS(profilés reconstruits soudés), mixte					

Références

- [1] Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages - version consolidée du 3 septembre 2018 [Direction Générale de la Prévention des Risques pour le Ministère de la transition écologique et solidaire]
- [2] Séismes du sud de la Turquie du 6 février 2023 (<https://www.irsn.fr/actualites/seisme-sud-turquie-6-fevrier-2023-note-dinformation>)
- [3] Séismes du 6 février 2023 Gaziantep et Kahramanmaraş, Turquie, Rapport AFPS de missions post-sismique (<https://www.afps-seisme.org/rapports-de-missions-post-sismiques/2023-kahramanmaras-turquie>)
- [4] Séisme du 1er janvier 2024 dans la péninsule de Noto, Japon (https://www.irsn.fr/sites/default/files/2024-01/IRSN_Fiche-Seisme-Japon-Noto-1-janvier-2024_V1-04012024.pdf)
- [5] International symposium CFBR JCOLD – Séminaire de Saint-Malo, Comparison of gate design criteria for gates between Japan & French [P.G. Bouquier & M. Kashiwayanagi – 2016]
- [6] International symposium CFBR JCOLD – Séminaire de Saint-Malo, Modal analysis of gate [Graveleine & Lhuillier – 2016]
- [7] DIN 19704 – Hydraulic steel structures, water engineering, design analysis, edition 2014
- [8] NF EN 1998 - Eurocode 8 — Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
- [9] USACE. Design of hydraulic steel structures. ETL_1110-2-584 2014.
- [10] Rapport rédigé à la demande du MEDDE – DGPR, Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques, Version définitive - octobre 2014
- [11] Seismic Induced Loads on Spillway Gates Phase I – Literature Review, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation [Jerzy W. Salamon – 09/2011]
- [12] Design of lock gates under seismic actions_Report_151_Part2-2016 [PIANC – 2016]
- [13] DAMS SUBJECTED TO EARTHQUAKES - HARMONIZED FEEDBACK DATABASE ACROSS THE GLOBE - 17th World Conference on Earthquake Engineering - Paper N° C002573 [N. Humbert, J.E. Daniell, A.M. Schaefer – 09/2020]
- [14] OFEG. Vérification des ouvrages d'accumulation au séisme. Version 1.2 mars 2003.
- [15] WESTERGAARD, H.M. (1933) Water Pressures on Dams During Earthquakes.
- [16] Article de Zangar : http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/EM/EM11.pdf.
- [17] CONSEQUENCES ON THE DESIGN PRACTICE OF WORLDWIDE DAM ACCIDENTS, GIGB Q.105 – R.35, Marseille juin 2022 [Roger BREMEN, Lombardi SA Ingegneri Consulenti]