

ETABLIR LA COTE DE DANGER D'UN BARRAGE. QUESTIONS SOULEVÉES ET ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES POUR Y RÉPONDRE.

How to determine the danger water level of a dam ?

Questions raised and guidelines.

Benoît HOUDANT

EDF Hydro, Centre d'ingénierie Hydraulique

benoit.houdant@edf.fr

Benoît GEHANT

OXAND

benoit.gehant@oxand.com

MOTS CLEFS

Cote de danger (CDD), cote des plus hautes eaux (PHE), cote de vulnérabilité, cote fusible, étude de dangers (EDD), plan particulier d'intervention (PPI), barrage en remblais, barrage rigide, barrage voûte, barrage mobile en rivière (BMR), barrage composite, composant fusible.

KEY WORDS

Dam safety, risk assessment, maximum water level, danger water level (DWL), vulnerability water level, fuse water level, French regulation about dam safety, embankment dam, concrete gravity dam, RCC dam, arch dam, gate-structure dam, composite dam, fuse component.

RÉSUMÉ

Cette communication retrace le contexte dans lequel la notion de cote de danger (CDD) a été progressivement définie en France. Elle précise les données d'entrée et les principes généraux utilisés pour établir la CDD d'un barrage. La communication s'attache également à mettre en lumière plusieurs questionnements inhérents à l'établissement de la cote de danger, et à proposer en réponse des éléments méthodologiques.

ABSTRACT

This article shows how the concept of danger water level (DWL) has emerged in France for dam engineers, and how it is defined today in the French regulation. We give the input data required to determine the DWL for a dam. We highlight several questions raised for any engineer who has to determine the DWL. We give some methodological advice to help engineers to answer to these questions.

1. UNE BREVE HISTOIRE DE LA COTE DE DANGER

La notion de cote de danger a été progressivement définie par la profession et la réglementation en France.

Ni le décret de 1992 [1] établissant les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) concernant certains grands barrages¹, ni son arrêté d'application de 1994 [2], ni l'arrêté de 2002 venant abroger ce dernier [3], ne mentionnaient de cote de danger pour un barrage. Cette réglementation identifiait néanmoins « **l'état de péril imminent** [...], lorsque l'exploitant estime qu'il n'a plus le contrôle de l'ouvrage ».

La pratique des PPI a ensuite rapidement associé la notion de cote de danger à cet état de péril imminent. Dans le même temps, une approche forfaitaire était adoptée pour fixer cette cote de danger, comme le détaille le rapport français de 2000 au congrès de la CIGB à Beijing [4] :

« Sauf cas exceptionnel, on admet que la cote de danger correspond à :

La cote de la crête pour un barrage en remblais. Cette cote peut éventuellement être abaissée au niveau supérieur du noyau pour un barrage zoné ;

La cote de la crête majorée d'un mètre environ pour un barrage en béton ».

Ainsi, dans les années 1990 et 2000, la réglementation française n'utilisait pas le terme de cote de danger, mais cette notion a malgré tout émergé pour préciser l'état dit de « péril imminent ». La cote associée à cet état était alors définie de façon forfaitaire, comme indiqué dans le rapport français CIGB de 2000.

¹ Le décret PPI de 1992 concerne les barrages de plus de 20 mètres sur terrain naturel, et de capacité supérieure à 15 hm³.

En 2009, lors du colloque CFBR-SHF consacré aux évacuateurs de crue, Royet *et al.* [5] proposaient des définitions pour la « cote de danger de rupture : cote au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs pouvant conduire rapidement à la rupture. L'atteinte de cette cote constitue un état limite ultime pour l'ouvrage. ». Les auteurs confirment que cette cote correspond à « l'état de péril imminent pris lorsque l'exploitant estime qu'il n'a plus le contrôle de l'ouvrage » (au sens de la réglementation PPI). Ils précisent également la manière de déterminer cette cote en pratique (de façon plus détaillée que suivant le rapport français au congrès CIGB de Beijing en 2000 [4]) :

« La pratique consiste à déterminer cette cote de la façon suivante :

- cote de la crête pour un remblai semi-homogène ou à masque amont ;
- cote d'arase du noyau pour un remblai zoné ;
- cote conduisant au débordement d'un coursier avec érosion du talus aval d'un remblai ;
- cote correspondant à la limite de résistance à l'effort tranchant ou à l'ouverture de fissure d'un barrage ou d'une digue poids ;
- cote pouvant être sensiblement supérieure à la crête pour un barrage voûte. »

Le CFBR publie en juin 2013 ses *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages* [6], dans lesquelles il indique que « [la cote de danger] s'est imposée au groupe de travail comme une composante obligatoire de l'estimation de la marge de sécurité d'un ouvrage ». Ce document précise que « la cote de danger correspond à la cote au-delà de laquelle on ne sait plus garantir la stabilité de l'ouvrage ».

Cette définition est reprise dans l'arrêté du 6 août 2018 [7] fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages : « **La cote de danger, intrinsèque à l'ouvrage, est la cote de retenue au-dessus de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie.** ». L'arrêté du 3 septembre 2018 [8] prévoit que « l'étude de dangers établit, au regard de la stabilité de l'ouvrage, la cote de danger, intrinsèque à l'ouvrage, à prendre en compte ; c'est-à-dire la cote de la retenue au-dessus de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie ».

C'est bien la définition que nous suivons dans cet article, tout en précisant les questions que cette définition soulève.

2. LES ELEMENTS A PRENDRE EN COMPTE POUR ETABLIR UNE CDD

Pour établir la CDD d'un barrage conformément à la réglementation française, l'ingénieur doit prendre en compte l'ensemble des éléments relatifs au barrage (conception, réalisation, maintenance, exploitation) et à sa fondation (en particulier l'érodabilité du massif rocheux en aval, s'il envisage de positionner la CDD au-dessus de la crête du barrage, dans le cas d'un barrage rigide).

2.1. Prendre en compte les éléments intrinsèques au barrage et à sa fondation...

L'ingénieur intégrera toutes les données et observations disponibles concernant l'historique du comportement du barrage. Ces éléments seront tirés des rapports de visite technique approfondie et d'examen technique complet, des rapports d'auscultation, d'études de comportement et de stabilité, des rapports de crue et de tout autre retour d'expérience d'événement rare ou exceptionnel sur le barrage considéré (en particulier les déversements notables et leurs conséquences si elles sont connues). Il intégrera également bien entendu toutes les études ayant été menées sur le passage des crues et le dimensionnement et le fonctionnement des évacuateurs de crue du barrage.

2.2.... mais aussi des éléments relatifs à l'environnement du barrage, et à sa typologie

Dans le cas d'un barrage rigide, si l'analyse conduit à positionner la CDD au-dessus du couronnement, l'ingénieur devra intégrer, outre la sensibilité intrinsèque de l'ouvrage à la surverse et la tenue du parapet :

- le risque d'érosion de la fondation aval ou des appuis ;
- l'élévation du niveau d'eau en aval du barrage, et le risque de mise en charge de la fondation aval ou des appuis (perte de stabilité), en particulier au niveau des drains.

Dans tous les cas, l'ingénieur devra également intégrer dans son étude les enseignements tirés du retour d'expérience issu de l'accidentologie mondiale pour le type de barrage concerné.

3. QUELQUES PRINCIPES GENERAUX POUR ETABLIR LA CDD

Si la réglementation (cf. réf. [7] et [8]) exige à présent de s'écarter d'une approche forfaitaire pour désormais produire une étude spécifique établissant la cote de danger, on peut cependant retenir plusieurs principes généraux qui permettent de guider l'ingénieur en charge d'établir la CDD.

3.1. Les deux principaux facteurs : résistance au chargement hydrostatique et résistance aux écoulements liés au déversement par-dessus la crête

La CDD d'un barrage est principalement conditionnée par deux facteurs :

- la résistance intrinsèque du barrage et de sa fondation au chargement hydrostatique (stabilité structurelle) ;
- la résistance du barrage (son parement aval, ses appuis, et sa fondation aval) aux écoulements liés au déversement par-dessus la crête (déferlement de vagues ou écoulement continu).

La CDD d'un barrage sera prise comme la cote minimale pour laquelle l'une de ces deux limites de résistance est atteinte.

3.2. Résistance intrinsèque du barrage et de sa fondation au chargement hydrostatique (stabilité structurelle)

On donne ci-dessous quelques grands repères pour établir en première approche la CDD d'un barrage ; ces éléments sont bien entendu à adapter selon l'état de l'ouvrage et son comportement (en fonction des éléments collectés décrits au paragraphe 2) :

- pour un barrage rigide (barrage-poids, barrage à contreforts ou multi-voûtes, ou barrage-voûte) : la CDD peut être établie à la cote correspondant à l'atteinte d'un critère d'état-limite ultime de résistance de la structure ou de la fondation (cisaillement), avec les jeux de coefficients partiels s'appliquant à la catégorie des situations extrêmes égaux à 1 ;
- pour un barrage en remblai homogène ou à masque amont : la CDD peut être établie à la cote de la crête ou du sommet du masque. L'ingénieur devra le cas échéant étudier la résistance du parement aval au déferlement de vagues ;
- pour un barrage en remblai zoné : la CDD peut être établie à la cote d'arase du noyau ;
- pour tous types de barrages en remblai, avec un coursier en contact avec le remblai : la CDD peut être établie à la cote conduisant :
 - soit au débordement du coursier de l'évacuateur de crues, du fait du risque d'érosion du talus aval du remblai (en tenant compte, le cas échéant, de la formation d'ondes stationnaires et du gonflement de la lame d'eau par entraînement d'air) ;
 - soit à des recirculations hydrauliques en pied aval du barrage susceptibles d'éroder celui-ci.

NB1 : pour les barrages en remblais, l'ingénieur devra en outre vérifier le non-dépassement d'états limites ultimes de résistance du barrage et de sa fondation.

NB2 : l'approche de l'ingénieur ne peut pas être purement calculatoire ; les résultats quantitatifs des modélisations ne sont qu'un élément d'appréciation du comportement des barrages en béton (en particulier les voûtes). La cote au-delà de laquelle la sûreté de l'ouvrage ne peut être démontrée ne relève pas uniquement des niveaux de contraintes atteints, d'autant que les modèles ne permettent pas toujours une fidèle représentation de l'effet des sous pressions et de la fissuration. L'état limite ultime de résistance du barrage et de sa fondation relève donc d'une appréciation de l'ingénieur, sur la base de résultats de calculs mais aussi de son expérience des modèles utilisés, de sa connaissance du comportement du barrage et de ses éventuelles pathologies.

3.3. Résistance du barrage (son parement aval, ses appuis, et sa fondation aval) aux écoulements liés au déversement par-dessus la crête

Dans le cas des barrages rigides (béton, maçonnerie, BCR, remblais durs), l'ingénieur peut être amené à positionner la CDD au-dessus du couronnement du barrage. Il devra alors intégrer une étude d'érosion du parement aval du barrage, de ses appuis et de sa fondation aval.

3.4. Précaution importante concernant les barrages de faible hauteur ou des plots de rive de barrage de plus grande hauteur

L'ingénieur devra porter une attention particulière aux barrages de faible hauteur ou aux plots de rive dans le cas de barrage de grande hauteur (en particulier pour les barrages poids béton et les culées de voûtes). En effet, l'impact de l'incrément du chargement hydrostatique dépend fortement de la hauteur de la section considérée du barrage. Ainsi, pour les barrages de grande hauteur, et surtout si le risque d'érosion des appuis est avéré, il conviendra de justifier que la stabilité est assurée également sur les plots de rives.

4. LES QUESTIONS SOULEVEES LORS DE L'ETABLISSEMENT D'UNE CDD

Une fois ces grands principes fixés, l'ingénieur reste confronté à plusieurs questions d'importance.

Nous évoquons celles qui nous paraissent les plus délicates, et donnons (quand nous pouvons) quelques éléments de méthode pour y répondre.

4.1.A quelle probabilité de rupture correspond la CDD ?

4.1.1. CDD et probabilité de rupture d'un barrage

NB : On ne traite pas ici de la question de la probabilité d'atteinte de la CDD, question qui nécessite de recourir à une analyse hydrologique des crues extrêmes, et à une étude de la fiabilité des organes d'évacuateur de crue en prenant en compte le cas échéant le risque « corps flottants ». On s'intéresse ici à la probabilité de rupture d'un barrage lorsque la CDD est atteinte (et ce quelle qu'en soit la raison).

On comprend bien que la probabilité de rupture d'un barrage à la cote de danger correspond à une probabilité ε « significative », mais pas égale à 1 ; car comme indiqué dans les recommandations du CFBR, « il y a en effet encore des marges cachées dans les méthodes de calcul [...] et dans l'appréciation de l'ingénieur » [6].

Le choix de ce niveau de probabilité ε est donc important pour guider l'ingénieur sur le niveau auquel il place la CDD. S'il est important, ce choix est néanmoins complexe : l'ingénieur ne dispose pas (ou rarement) d'outil probabiliste de calcul de rupture selon les paramètres hydrauliques et mécaniques considérés pour le barrage et sa fondation.

Au-delà de cela, c'est un vrai changement de culture auquel l'ingénieur doit faire face : il ne s'agit plus pour lui de seulement **justifier la tenue d'un ouvrage** à RN ou PHE avec plus ou moins de marges de sécurité (marges censées couvrir en particulier les incertitudes sur les données d'entrée), autrement dit, d'en démontrer la stabilité. Il s'agit pour ce nouvel exercice d'établir une cote au-delà de laquelle il n'est plus en capacité de démontrer la tenue de l'ouvrage, autrement dit **d'estimer la rupture comme un événement possible voir probable**.

L'ingénieur passe d'un domaine très connu (vérification de la stabilité d'un ouvrage soumis à divers chargements, avec des marges de sécurité conformes à l'état de l'art) à un domaine qui lui est peut-être moins familier : l'estimation de la probabilité de rupture d'un ouvrage dont il a l'habitude de garantir la tenue.

L'exercice est difficile, tant pour des raisons de psychologie générale (il se trouve placé aux limites de son savoir -ce qui peut être désagréable- dans la mesure où on lui demande de se prononcer sur une cote au-delà de laquelle **il ne sait plus garantir** la stabilité de l'ouvrage), que pour des raisons de psychologie cognitive (pas ou peu d'outils à sa disposition, peu l'habitude de se poser ce type de questions) ou de psychologie sociale (la société, ou la profession, lui a toujours assigné un rôle de sachant, apportant des garanties). Etant donnée la faible accidentologie mondiale (et c'est heureux), il ne peut pas non plus s'appuyer sur une approche fréquentiste des probabilités (basée sur une fréquence d'occurrence de rupture) ; il doit donc s'appuyer sur une approche subjective –ou bayésienne– (basée sur une prise de pari). Si l'approche des probabilités bayésiennes a des assises mathématiques solides [9], cette approche est néanmoins souvent éloignée de la pratique de l'ingénieur dans le domaine des barrages, pour les raisons évoquées plus haut.

Cela étant, puisqu'il ne peut plus garantir la stabilité du barrage à la CDD, l'ingénieur doit se résoudre à associer une probabilité à la rupture du barrage soumis à la CDD (au moins en ordre de grandeur, et après une éventuelle période d'acculturation à ce nouveau concept de probabilité subjective). Il peut par exemple choisir de retenir une valeur de l'ordre de 0,1 comme probabilité associée à la rupture du barrage soumis à la CDD. Cela implique bien entendu que dans la « zone grise » comprise entre la cote des PHE et la CDD, la probabilité de rupture n'est pas nulle.

NB1 : Cet ordre de grandeur de 0,1 correspond à une valeur maximale admissible pour la probabilité de rupture d'un barrage à la CDD. En suivant les grands principes établis au paragraphe 2, l'ingénieur peut choisir d'adopter une approche simplifiée, plus sécuritaire, pour établir la CDD (par exemple la cote du sommet du noyau d'étanchéité pour un barrage zoné) ; la probabilité de rupture associée à cette cote sera alors souvent inférieure à de telles valeurs (sauf pathologie ou défaut de conception du barrage).

NB2 : Même si, comme nous l'avons développé au cours de ce paragraphe, la probabilité de rupture du barrage à la CDD est bien inférieure à 1, on considère tout de même, pour la justification de la sécurité, que l'atteinte de la CDD entraîne la rupture du barrage (avec une probabilité de 1).

4.1.2. De l'usage des probabilités dans le domaine de la sécurité des barrages et des digues

Dans un autre domaine, et même si l'exercice s'est montré difficile au début, l'introduction des probabilités pour la prévision des crues a montré des avantages importants [10]. Prévisionnistes et exploitants de barrages hydroélectriques ont su s'approprier le langage des probabilités pour mieux communiquer sur le risque hydrologique [11] et [12], et in fine améliorer la sûreté du barrage en crue.

Dans un autre domaine plus proche, les EDD des digues de protection contre les inondations, l'usage des probabilités est désormais bien établi [13]. Il faut noter néanmoins qu'étant données la nature et l'histoire parfois pluri-séculaire de ces ouvrages (et de ce fait non conformes aux règles de l'art actuelles), l'accidentologie est bien plus fournie que celle des barrages. Par exemple, pour estimer la probabilité de rupture d'une digue à une cote donnée, le gestionnaire des digues du delta du Rhône peut s'appuyer sur une accidentologie de 11 brèches et 17 départs de brèches en seulement 20 ans (1993-2003) [13]. La profession a ainsi proposé en 2013 des probabilités de ruptures associées aux différentes cotes [14] : « pour la crue de dimensionnement ou crue de sûreté, la probabilité de rupture associée est de 10 % et pour la crue de danger, cette probabilité est de 50 % ». En 2017 la réglementation relative aux digues de protection [15] a respectivement retenu les valeurs de 5% et 50%.

Enfin, à l'international, dans le domaine des études de dangers de barrage ("dam safety & risk assessment"), plusieurs de nos collègues de la CIGB ont adopté l'approche bayésienne (probabilités subjectives) pour qualifier les probabilités de rupture de barrage conditionnées à diverses cotes ou paramètres mécaniques du barrage ou de ses fondations [16]. Lacasse & Höeg [17] montrent que cette approche vient naturellement à l'ingénieur, puisqu'il ne s'agit ni plus ni moins que d'un complément à la méthode observationnelle développée par Terzaghi puis par Peck [18], et très largement utilisée par les géotechniciens depuis plus de 50 ans.

L'histoire doit donc nous rendre optimistes sur les capacités de l'Ingénieur, l'Exploitant, et l'Administration à adopter en France ce nouveau langage dès lors qu'on évoque la notion de cote de danger d'un barrage ; car la cote de danger est intrinsèquement liée... aux probabilités !

4.2. Comment prendre en compte la cinétique des mécanismes de ruine de l'ouvrage ?

Les mécanismes de ruine de barrage peuvent dépendre de l'ampleur et de la durée de l'exhaussement du plan d'eau. C'est par exemple le cas d'une érosion régressive de la fondation en aval d'un barrage rigide suite à un déversement prolongé, ou le cas d'une érosion de parement aval d'un barrage en remblais suite à déversement par-dessus la crête².

L'ingénieur peut être alors amené à intégrer divers scénarios (hydrologie/exploitation) permettant de caractériser des événements pouvant mener à la ruine de l'ouvrage. On voit bien dès lors que la CDD n'est plus, comme indiqué dans les textes réglementaires [7] et [8], **intrinsèque à l'ouvrage**, mais qu'elle dépend du contexte de celui-ci (climatologie des pluies extrêmes et comportement du bassin versant, qui gouvernent la forme de l'hydrogramme de crue).

Intégrer la cinétique des mécanismes de rupture est donc un exercice très délicat pour lequel l'ingénieur est particulièrement démuné... tout comme les auteurs de ces lignes.

4.3. Comment positionner la CDD dans le cas de barrages mobiles en rivière qui restent stables pour des crues extrêmes ?

Certains barrages mobiles en rivière (BMR) en crue ont des cotes amont et aval très proches du fait des contournements de l'ouvrage, et de ce fait peuvent rester stables même à des cotes très élevées. Dans ce cas, la cote de danger peut ne pas exister (cf. recommandations 2013 du CFBR [6]).

L'ingénieur doit alors étudier les **situations de danger** les plus pénalisantes pour l'ouvrage (cas de passes batardées par exemple).

Après avoir étudié l'ensemble des situations de danger qui lui paraissent les plus pénalisantes, l'ingénieur peut indiquer, dans le cas d'un BMR qui reste stable pour des crues extrêmes, que la cote de danger n'est pas définie.

4.4. Comment définir une CDD unique pour un barrage voûte particulièrement sensible thermiquement ?

Pour certains barrages voûtes minces, particulièrement sensibles à la température, le chargement thermique peut atteindre un ordre de grandeur comparable au chargement hydrostatique. La CDD en hiver peut ainsi être significativement plus basse que la CDD en été.

Une fois encore, contrairement à ce qui est indiqué dans les textes réglementaires [7] et [8], la CDD n'est plus **intrinsèque à l'ouvrage**, puisqu'elle dépend de la saison (chronique de température de la période passée).

L'ingénieur doit alors, dans une **approche saisonnière**, intégrer les chargements thermique et hydraulique de la voûte pour en déterminer la CDD. L'ingénieur peut alors être amené à indiquer deux CDD, conditionnées à la saison : une CDD estivale et une CDD hivernale, en précisant les périodes associées.

4.5. Comment définir une CDD unique pour un barrage constitué de plusieurs ouvrages de caractéristiques constructives différentes ?

Lorsqu'on s'intéresse à un composant d'un barrage (un ouvrage structurel tel qu'une digue de fermeture, une passe vannée, une usine, etc.), on utilise le terme de **cote de vulnérabilité** pour désigner la cote au-delà de laquelle la stabilité de ce composant n'est plus garantie.

Lorsqu'un barrage est constitué de plusieurs ouvrages de caractéristiques constructives différentes, on peut définir la notion de barrage composite. En pratique, on s'intéresse au caractère composite d'un barrage quand ses composants

² Par exemple, la rupture du barrage en remblais de Tous (Espagne, 2007, cf. [19]) suite à une surverse importante a été relativement lente : plus de 2h, avec une charge atteignant 1,10 m au dessus de la crête. La largeur du barrage en crête très importante (62 m, car le projet prévoyait une surélévation ultérieure) explique en partie la vitesse de ruine relativement faible. Cette rupture a fait une trentaine de victimes, l'ordre d'évacuation ayant été donné tardivement (cet ordre d'évacuation a concerné 100 000 personnes).

présentent des caractéristiques constructives suffisamment variées pour qu'on puisse les différencier par des modes de défaillance et des cotes de vulnérabilité différents.

On peut ainsi considérer comme composants distincts, si c'est justifié par des particularités constructives locales :

- barrage poids / digue de fermeture en remblais ;
- barrage voûte / barrage de fermeture de faible hauteur ;
- plot d'un barrage poids non solidaire mécaniquement du reste du barrage (pas de clé de cisaillement) ;
- barrage usine / barrage mobile en rivière.

NB : si on étend la notion de composant à la vannerie, on peut pratiquement considérer que tous les barrages vannés présentent un caractère composite. On réservera cependant la terminologie d'ouvrage composite à un ouvrage composé de plusieurs éléments structurels (ouvrages de génie civil).

Pour établir la CDD du barrage composite, l'ingénieur doit avoir à la fois une approche analytique (modes de défaillance ouvrage par ouvrage), et systémique (pour définir les situations dans lesquelles la fonction « retenir l'eau » n'est plus assurée par le barrage composite).

L'intérêt de la prise en compte du caractère composite d'un barrage est de dissocier des scénarios de rupture « totale », peu réalistes, au profit de scénarios de rupture « partielle » du barrage (rupture de l'un de ses composants), plus proche de ce que l'on constate en analysant l'accidentologie mondiale.

Nous proposons de définir la CDD d'un barrage composite comme la cote de vulnérabilité la plus basse des différents **composants structurels majeurs** de ce barrage.

Par composant structurel majeur, nous entendons

- un ouvrage de génie-civil (ouvrage statique) ;
- suffisamment important (c'est-à-dire dont le ratio des sections mouillées est supérieur à 10%³) ;
- dont la rupture entraîne une onde de submersion suffisamment importante, largement supérieure par exemple à celle de la plus grande vanne du barrage.

4.6. Comment intégrer la rupture de vannes dans l'établissement de la CDD d'un barrage (en particulier pour les barrages mobiles en rivière) ?

Dans certains cas, la rupture du plus gros organe mobile (par exemple une vanne principale d'un barrage mobile en rivière) peut avoir des conséquences tout aussi importantes que la rupture d'un composant structurel (statique) de l'ouvrage. Il serait donc tentant d'intégrer la cote de vulnérabilité des vannes dans la détermination de la cote de danger du barrage.

Cela soulève la question de la définition d'une cote de vulnérabilité pour un organe mobile, dont la sensibilité à l'élévation de cote varie suivant le degré d'ouverture :

- Une vanne de surface, sensible au déversement, peut avoir une cote de vulnérabilité au niveau de son bordé supérieur. Si la vanne est ouverte, même partiellement, cette cote est plus haute que si elle est fermée ;
- De la même façon, une vanne en conduite reprend nettement plus d'efforts (par effet de fond) si elle est fermée que si elle est ouverte, et sa sensibilité à l'exhaussement est donc fortement diminuée à l'ouverture.

C'est la raison pour laquelle nous avons proposé, au paragraphe précédent, de n'intégrer dans la définition de la CDD que les ouvrages statiques, et d'écarter les organes mobiles⁴.

Cette approche permet de distinguer la rupture d'un barrage de celle d'une vanne : si les deux sont évidemment étudiés dans l'EDD (et peuvent avoir parfois des conséquences aussi importantes), la CDD est bien associée à la « stabilité de l'ouvrage » et non à la « tenue d'une vanne ». Cette approche est bien cohérente avec les usages de la profession [6], et bien entendu avec la réglementation [7] et [8], qui ne mentionne la CDD que par rapport à la « stabilité de l'ouvrage⁵ ».

³ On donne ici un ordre de grandeur permettant de se positionner sur une valeur « raisonnable » permettant de qualifier la rupture du barrage (si on perd plus de 10% du barrage, sauf organe mobile, on qualifie l'événement de rupture de barrage, et la cote associée à cette rupture est qualifiée de cote de danger. Cette valeur est à adapter au cas par cas, en fonction des configurations particulières (hauteur maximale du barrage, longueur en crête).

⁴ Attention toutefois : la CDD du barrage peut dépendre indirectement de la cote de vulnérabilité d'une vanne, dans le cas par exemple où la rupture de la vanne entraîne une érosion aval qui provoque ensuite la rupture du barrage.

⁵ Le terme ouvrage renvoie au génie-civil, par opposition au terme organe, qui renvoie à la vannerie.

4.7. Peut-on prendre en compte le caractère fusible d'un composant de barrage, que ce soit un ouvrage de génie-civil ou une vanne ?

On définit dans cet article la cote fusible d'un composant de barrage (partie d'ouvrage ou organe mobile) comme la cote au-delà de laquelle l'ingénieur est « presque sûr » de la rupture du composant ; autrement dit la cote pour laquelle la probabilité de rupture est de l'ordre de 0,9 à 0,99.

Avertissement : le concept de composant fusible pour un barrage est à manier avec beaucoup de précaution. L'histoire a en effet montré que beaucoup d'ouvrages ayant été conçus pour être fusibles ne l'ont pas été dans la pratique (voir par exemple le retour d'expérience des déversoirs fusibles de digues de protection contre les inondations [20]). Or, nous nous intéressons dans ce chapitre aux ouvrages conçus comme fusibles, mais aussi à tous les ouvrages et organes n'ayant pas été conçus comme fusibles, mais dont l'ingénieur estime que la rupture interviendra pour une cote significativement plus faible que la cote de danger du barrage principal. Si des ouvrages dits fusibles ont montré par le passé qu'ils ne l'étaient pas, il convient a fortiori d'être très prudent lorsqu'on qualifie un ouvrage ou un organe de fusible, alors que celui-ci n'a pas été conçu comme tel (et qu'au contraire le calcul de justification de sa tenue comporte des conservatismes et des facteurs de sécurité).

Cela étant, l'ingénieur peut parfois considérer que la rupture d'un ou plusieurs **composants secondaires**⁶ (vanne, petite digue de fermeture, etc.) interviendra pour une cote significativement plus basse que la CDD du barrage principal. Le débit relâché à l'aval sera ainsi significativement augmenté, réduisant ainsi la probabilité d'atteinte de la CDD (la CDD ne sera pas modifiée, mais elle sera atteinte pour une crue d'un temps de retour significativement plus important).

Nous établissons alors plusieurs concepts pouvant être utiles à l'ingénieur pour caractériser la performance du fusible considéré. La performance d'un fusible s'apprécie par :

- sa **fiabilité** : un fusible est fiable si sa cote fusible est significativement inférieure à la cote de danger de l'ouvrage principal ;
- sa **sélectivité** : un fusible est d'autant plus sélectif que sa cote fusible est proche de sa cote de vulnérabilité ;
- son **efficacité** : un fusible est efficace si sa rupture réduit significativement la probabilité de rupture de l'ouvrage principal. En pratique, il faut a minima que le débit libéré par l'ouvrage fusible augmente d'une décade le temps de retour de la crue nécessaire à l'atteinte de la cote de vulnérabilité de l'ouvrage principal.

La fiabilité et la sélectivité d'un fusible peuvent être produites par des phénomènes non linéaires en fonction de la cote (introduction de sous-pressions dans des hausses Hydroplus par exemple). L'efficacité du fusible dépend directement du débit libéré.

4.8. Savoir détecter des configurations particulières qui peuvent mettre en danger le barrage

Pour déterminer la CDD, l'ingénieur devra enfin être vigilant à bien analyser toutes les voies de contournement hydraulique possibles, pouvant mettre en situation de danger tout ou partie de l'ouvrage, par exemple :

- non fermeture hydraulique d'un parapet sur une culée de barrage ;
- mise en charge d'un réseau de drainage situé en pied aval du barrage suite à déversement sur la crête de l'ouvrage ;
- existence d'un puits « technique » sur le couronnement d'un barrage rigide, qui lors d'un déversement se remplirait d'eau et viendrait mettre en charge la galerie périmétrale et le réseau de drainage ;
- ennoisement d'un local abritant des dispositifs de contrôle-commande ;
- etc.

Cette dernière mise en garde nous permet de conclure sur l'importance de dépasser une approche purement calculatoire, pour que l'ingénieur puisse avoir une vision de synthèse sur le comportement du barrage soumis à des cotes très élevées, proches de sa cote de rupture.

⁶ Attention toutefois : si le composant considéré peut être qualifié de « composant structurel majeur du barrage » tel que défini au paragraphe 4.5, la CDD du barrage sera définie comme égale à la cote de vulnérabilité de ce composant (comme indiqué en 4.5). On ne s'intéresse donc dans ce paragraphe 4.7 qu'à des composants suffisamment petits pour que leur rupture ne puisse pas être considérée comme la rupture du barrage, mais suffisamment importants pour libérer un débit suffisant pour abaisser significativement la probabilité d'atteinte de la CDD du barrage. Suite à l'avertissement de début de chapitre, c'est une 2^e raison de manier ce concept avec beaucoup de précaution.

5. EN CONCLUSION

La CDD établie dans l'EDD relève d'une expertise s'appuyant sur le retour d'expérience de l'ouvrage concerné, l'accidentologie et l'incidentologie des ouvrages analogues, et le cas échéant une étude de stabilité.

Pour les barrages rigides, l'établissement de la CDD intègre les deux aspects : résistance du barrage et de sa fondation au chargement hydrostatique, et résistance du barrage et de sa fondation aux écoulements par surverse.

Par ailleurs, il est important de retenir que :

- La CDD peut différer de certaines valeurs forfaitaires initialement retenues pour les barrages soumis à PPI (par exemple crête ou crête + 1m pour les ouvrages en béton) ;
- La CDD peut évoluer lors de la mise à jour de l'EDD. Deux raisons à cela : d'une part parce qu'on écarte une approche forfaitaire au profit d'une étude argumentée ; d'autre part parce que certains barrages sont évolutifs (par exemple un barrage en béton soumis à gonflement), et que l'étude établissant la CDD intègre les dernières informations d'auscultation concernant le comportement de l'ouvrage, et parfois de nouveaux outils de modélisation ;
- Dans certains cas particuliers plusieurs CDD peuvent exister : par exemple sur un barrage-voûte sensible thermiquement (celles-ci sont associées à des périodes différentes) ;
- Dans certains cas particuliers la CDD n'existe pas : par exemple pour un barrage mobile en rivière dont les cotes amont et aval sont très proches et qui de ce fait reste stable pour des crues extrêmes, du fait des contournements de l'ouvrage (cf. recommandations 2013 du CFBR [6]) ;
- Considérer un barrage comme composite peut amener à considérer des scénarios de rupture partiels, et donc à réduire les conséquences à l'aval, sans toutefois modifier la CDD ;
- Considérer des composants fusibles peut parfois amener à réduire la probabilité d'atteinte de la CDD sans pour autant modifier celle-ci.

REMERCIEMENTS

Ces réflexions ont été alimentées par des échanges divers avec des ingénieurs d'EDF-CIH (en particulier Frédéric Laugier, Philippe Kolmayer, Jean-Noël Maillet, Jean-Marie Boutet, Jean-Robert Courivaud, Olivier Cheruy, Bernard Reverchon, Thomas Viard, Manuel Antunes, Estelle Fistarol et Denis Aelbrecht), d'EDF-Hydro (Laurent Bessadi), d'EDF Lab (Nicole Goutal), ainsi que d'autres organismes (en particulier Thibaut Mallet du Symadrem). Merci à eux.

Merci également aux deux relecteurs du CFBR pour leurs remarques qui nous ont permis de clarifier plusieurs points.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Décret du 15 septembre 1992 établissant les Plans Particuliers d'Intervention concernant certains grands barrages
- [2] Arrêté du 1er décembre 1994 pris en application du décret no 92-997 du 15 septembre 1992 relatif aux plans particuliers d'intervention concernant certains aménagements hydrauliques
- [3] Arrêté du 22 février 2002 pris en application du décret n° 92-997 du 15 septembre 1992 relatif aux plans particuliers d'intervention concernant certains aménagements hydrauliques.
- [4] Analyse de risque et crue de danger, D. Bister, P. Le Delliou. 20^e congrès des grands barrages, CIGB Beijing 2000.
- [5] Cotes et crues de protection, de sûreté et de danger de rupture. P. Royet, G. Degoutte, L. Peyras, J. Lavabre, F. Lempérière. Colloque CFBR-SHF: Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues, Jan 2009, Paris, France.
- [6] Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, juin 2013
- [7] Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, Ministère de la transition écologique et solidaire.
- [8] Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, Ministère de la transition écologique et solidaire.
- [9] Foundations of statistics, Leonard Savage, 1954
- [10] Contribution à l'amélioration de la prévision hydro-météorologique opérationnelle. Pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs. Benoît Houdant, thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (Agro Paris Tech), mai 2004.

- [11] Expertise humaine des prévisions hydrométéorologiques et communication de leurs incertitudes dans un contexte décisionnel. Rémy Garçon, Benoît Houdant, Federico Garavaglia, Thibault Mathevet, Emmanuel Paquet et Joël Gailhard. La Houille Blanche 5, 2009.
- [12] Prévision hydrométéorologique opérationnelle à EDF-DTG – Progrès récents et état des lieux en 2018. Lætitia MOULIN, Alain ABONNEL, Damien PUYGRENIER, Audrey VALERY, Rémy GARCON, Colloque SHF « De la prévision des crues à la gestion de crise », Avignon, 14-16 Novembre 2018.
- [13] Etude de dangers du système d'endiguement Rive Gauche du Delta du Rhône, Thibaut MALLET, Charlie DAST, Marceau REQUI, Séverine CHARDES, Antoine CASTAGNET, SYMADREM, Arles, Jean-Jacques FRY, EDF-CIH, Le Bourget du Lac, Commission Internationale des Grands Barrages, Vingt-sixième Congrès des Grands Barrages, Vienne, Juillet 2018
- [14] Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités, Thibaut Mallet (SYMADREM), Gérard Degoutte (CTPBOH), Paul Royet (IRSTEA), Digue maritimes et fluviales de protection contre les submersions, 2e colloque national – Dignes2013, 12-14 juin 2013 à Aix-en-Provence.
- [15] Arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.
- [16] Simulation supported Bayesian network for estimating failure probabilities of dams, K. Ponnambalam & A. El-Awady, Department of Systems Design Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, S. Jamshid Mousavi, School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, A. Seifi, Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, ICOLD Proceedings, Ottawa, June 2019
- [17] In praise of monitoring and the Observational Method for increased dam safety, S. Lacasse & K. Höeg, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, ICOLD Proceedings, Ottawa, June 2019
- [18] Peck, R.B. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. The 1969 Rankine Lecture. Géotechnique. 19(1): 171–187.
- [19] BACCHUS Florent, DEROO Luc, LEMPERIERE François, POUPART Michel. Retour d'expérience des accidents de barrages liés au fonctionnement des évacuateurs de crue. In Colloque "Hydraulique des barrage et des digues". Chambéry : CFBR-SHF - 29,30 novembre 2017. p. 189-202.
- [20] Les déversoirs fusibles le sont-ils vraiment ? Paul Royet et Patrice Mériaux. Colloque « Sécurité des digues fluviales et de navigation », Orléans, novembre 2004. Comité Français des Grands Barrages et Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

