

## RETOUR SUR LES PRATIQUES DE JUSTIFICATION DE LA SÛRETE DES BARRAGES PRÉSENTÉES À L'ADMINISTRATION

### *Feedback on dam safety justification studies submitted to authorities*

Guirec PRÉVOT, Stéphan AIGOUY, Florent BACCHUS, Thomas CARLIOZ, Florian CHAMPIRÉ, Marc HOONAKKER, Tarik OUSSALAH, Laëtitia RIVOLLET, Jean-François VILLARD  
BETCGB, 17 boulevard Joseph Vallier 38000 Grenoble  
[prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr](mailto:prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr)

#### MOTS CLEFS

Barrages, Sûreté, Justification

#### KEY WORDS

Dams, Safety, Checking

#### RÉSUMÉ

*Dans le cadre de sa mission de contrôle des ouvrages hydrauliques, l'État s'assure que les responsables d'ouvrages justifient la tenue de leurs ouvrages en différentes situations d'exploitation. L'étude de dangers examine les différents scénarios de ruine qui sont directement dépendants de la sensibilité intrinsèque des ouvrages et de la fiabilité de leurs équipements.*

*Depuis le 6 août 2018, l'arrêté fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages donne les exigences essentielles de sécurité que doivent respecter les barrages neufs et anciens. Cet arrêté, dit «arrêté technique», explicite donc des objectifs de résistance des ouvrages vis-à-vis des aléas de crues et de séismes ainsi que des incidents exceptionnels mis en exergue par l'étude de dangers.*

*L'étude de dangers doit démontrer la sécurité de l'ouvrage au travers d'une vérification des exigences essentielles de sécurité appuyées en partie sur les deux annexes de l'arrêté technique.*

*Le vérificateur reste libre d'appliquer les méthodes les plus opportunes au cas par cas, associées à des critères d'acceptabilité sur les différents éléments concourant à la sécurité des ouvrages.*

*La démonstration de la maîtrise et de l'acceptabilité du niveau de sécurité indiqué dans les EDD est examinée par les services de l'État. Le BETCGB a ainsi pu avoir connaissance d'un grand nombre d'approches dans les différents domaines caractérisant la sécurité des ouvrages (près de 350 études de dangers examinées en sus des différentes études afférentes – structurelles, hydrauliques, hydrologiques...), avec parfois des divergences de pratiques. Cet article vise à présenter un état des savoir-faire sur différents sujets traités par les vérificateurs d'ouvrages. L'objectif de cette présentation est de mettre en avant les pratiques intéressantes de justification de la sûreté des ouvrages et leurs limites.*

*Plusieurs thématiques interrogeant la notion de cote de danger, les problématiques de prise en compte des vagues, les dispositions de vidange, les modélisations, ..., sont abordées.*

#### ABSTRACT

*As part of its mission to control hydraulic structures, the Government requires the owners to check the safety of their dams in different operating situations. The safety review examines the different failure scenarios that are directly dependent on the intrinsic resistance of the structures and the reliability of their equipment.*

*Since 6 August 2018, the decree laying down the technical requirements for the safety of dams has provided "essential safety requirements" for new and existing dams. Therefore, this decree indicates the objectives in terms of resistance of structures against floods and earthquakes as well as exceptional incidents highlighted by the safety review.*

*The safety review must demonstrate the safety of the structure through a verification of "essential safety requirements" supported in part by two technical annexes.*

*However, the owner with his consultant remain free to apply the most appropriate methods which are often linked with criteria of acceptability for the various elements contributing to the safety of the structures.*

*Demonstration of the control and acceptability of the level of safety indicated in safety reviews is examined by the government regulators. Thus, the BETCGB has seen a large number of approaches (around 300 safety reviews examined with their associated studies –stability, hydraulic, hydrology...) in the various fields characterizing the safety of structures, with sometimes divergences of practices. This article aims at presenting a state of the know-how on various subjects addressed by engineers. The aim is to highlight the most efficient practices for checking the safety of structures and their limits.*

*Several themes like the concept of safety water level, overtopping, bottom outlet or modeling, ..., are discussed.*

## 1. INTRODUCTION

Depuis 2007, la réglementation française sur la sûreté des barrages s'est étoffée. Quelques années après le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 qui introduisait les examens techniques complets et revues de sûreté pour les barrages de classe A ainsi que les études de dangers (EDD) pour les barrages de classes A et B, le décret 2015-526 [1] du 12 mai 2015 regroupe ces rapports dans l'EDD pour tous les barrages A et B. Cette EDD est désormais le document intégrateur permettant au responsable de l'ouvrage de démontrer la sûreté d'un ouvrage.

Cette démonstration doit s'effectuer dans le cadre du respect des exigences essentielles de sécurité formulées dans l'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages [2]. Ces dernières sont vérifiées en particulier par l'intermédiaire des annexes I et II de cet arrêté. Or, l'EDD doit se prononcer sur l'ensemble des risques impactant l'ouvrage et induits par ce dernier. Dans les EDD de première génération (env. 350 examinées par le BETCGB) et les études afférentes (hydrologie, hydraulique, structurelles...), les responsables d'ouvrages ont utilisé différentes méthodes et critères pour justifier la sécurité de leurs ouvrages.

Par l'examen de toutes ces justifications le BETCGB a ainsi pu avoir connaissance d'un grand nombre d'approches dans les différents domaines caractérisant la sécurité des ouvrages, avec parfois des divergences de pratiques. Cet article vise à présenter un état des pratiques, traduisant l'évolution des savoir-faire sur différents sujets traités par les vérificateurs d'ouvrages. Le but est de mettre en avant les pratiques intéressantes de justification de la sûreté des ouvrages et leurs limites.

Cet article ne suit pas un plan progressif mais s'attache à traiter des points incontournables de la sûreté des ouvrages en exploitation

## 2. VIDANGE DE FOND

Les dispositifs de vidange de fond, thématique traitée dans les études de dangers, sont des organes de sécurité importants « destinés à la vidange volontaire de la retenue (en cas de désordres graves, pour des opérations d'inspection, de maintenance) » [3]. La vidange de fond est souvent utilisée comme barrière de sécurité à un scénario de défaillance de la structure du barrage (exemple : rupture) afin d'interrompre le scénario de défaillance par abaissement de la charge amont.

### 2.1 Bibliographie

Dans le guide CFBR-Cemagref [4], le dispositif de vidange de la retenue est recommandé pour « permettre l'entretien et surtout la possibilité de vidange rapide en quelques jours en cas de danger [...] ». Des préconisations sur le dimensionnement des vidanges sont proposées, en particulier en fonction du critère  $H^2\sqrt{V}$ , sur les protections amont afin d'éviter tout problème dû au transport solide, et à l'aval pour éviter les affouillements (dissipateur d'énergie). Pour les retenues importantes ( $H^2\sqrt{V} > 30$ ), le guide indique que le diamètre adopté doit permettre de diviser par deux le volume d'eau en moins de 8 jours, le calcul étant fait sans tenir compte des apports naturels. Dans le cas des grands bassins versants, la conduite ainsi dimensionnée doit permettre, lorsque la retenue est pleine, d'évacuer le double du plus fort débit moyen mensuel. La crue de chantier retenue peut également conduire à augmenter le diamètre de la conduite de vidange de fond.

$H^2\sqrt{V}$ ( $m^2hm^{3/2}$ )	Type de conduite	Diamètre de la conduite en mm	Nombre et position des vannes
< 30	PVC ou acier	160 ou 200 PVC 200 à 300 en acier	une vanne aval
30 à 100	Acier	300 à 400	
100 à 300	Acier ou béton à âme tôle	400 à 600	une vanne de garde amont et une vanne aval
300 à 700		600 à 800	
700 à 1 500		800 à 1 200	
> 1500	galerie en béton armé (ou tuyau posé dans la galerie de visite)		vanne de garde et vanne réglable en aval

Figure 1 : Recommandations pour le dimensionnement des dispositifs de vidanges de fond [4]

La CIGB, dans son bulletin 49 « Exploitation des ouvrages hydrauliques de barrages » [5], indique que « la présence d'un organe de vidange est un facteur très important de sécurité dans le cas où un abaissement rapide du plan d'eau s'avère nécessaire. En particulier, l'ouvrage de vidange permet un bon contrôle du niveau du plan d'eau lors du premier remplissage, même s'il ne procure pas une sécurité absolue. ». Le bulletin recommande la réalisation d'essais périodiques sous charge totale avec un taux d'ouverture compatible avec les enjeux aval.

Le guide BETCGB [6] préconise des règles qui sont globalement suivies sur le parc français :

- Un dispositif de fond et équipé d'une vanne de garde amont permettant la maintenance sur la vanne aval et d'une vanne aval permettant un réglage fin des débits;
- Des grilles de protection de l'entonnement amont de la vidange à maille large pour limiter les risques de colmatage ;
- Un dimensionnement des vidanges de fond couramment admis pour les ouvrages nouveaux permettant :
  - Diminution de 50 % de la poussée sur le barrage en 8 jours en supposant les apports nuls et sans la participation de la prise usinière,
  - Vidange totale de la retenue en 21 jours dans les mêmes conditions ;
- Des procédures d'essais élaborées en prenant en compte les risques à l'aval.

## 2.2 Des bonnes pratiques constatées lors de l'instruction des EDD et études afférentes

La fonction « vidange de fond » est souvent utilisée dans les EDD comme barrière de prévention, face à des ERC (événements redoutés) incluant la rupture du barrage, en cas de remise en cause de la sécurité intrinsèque de l'ouvrage, en cas de comportement anormal détecté par l'auscultation, mais également parfois dans certaines circonstances de crue. Il est très satisfaisant de constater que l'acceptabilité de cette barrière est de plus en plus souvent évaluée à travers un niveau de confiance obtenu à partir des critères classiques suivants :

- Indépendance par rapport au scénario de défaillance identifié

Ce critère semble vérifié systématiquement lors des scénarios de défaillances hors crues. Dans les scénarios de crues, il apparaît impossible de réduire drastiquement la charge au moyen de la vidange de fond.

- Efficacité et temps de réponse

Avant de parler du dimensionnement de la vidange en tant que telle, le délai de prise en compte de la situation dangereuse et de la décision d'ouverture du dispositif de fond peut influencer sur le critère de temps de réponse. Des procédures dans le cadre de la politique de prévention des accidents majeurs et sa déclinaison dans le système de gestion de la sécurité ont pu ainsi être mises en place.

En termes de critères de vitesse d'abaissement, les critères [6] sont très souvent considérés. Notons que la demi-charge (qui est le critère le plus important) peut être évaluée de plusieurs manières, en fonction du type de barrage :

- Il peut s'agir d'un calcul sur un profil: la demi-charge est alors atteinte sur le profil de plus grande hauteur pour une hauteur d'eau égale à la hauteur d'eau à RN divisée par  $\sqrt{2}$  ;
- Il peut s'agir d'un calcul de résultante sur l'ensemble du parement amont, prenant en compte sa géométrie tridimensionnelle (barrage-voûte, barrage à masque amont...).
- Dans tous les cas, il ne s'agit jamais de la demi-hauteur par rapport à la hauteur à RN.

L'efficacité et la fiabilité ont pu être jugées par la prise en compte d'une capacité minimale de la vidange de fond (par rapport aux modules moyens mensuels) et également en termes de conception du conduit dans son ensemble : présence de grilles amont, présence de deux vannes en série ou non, espacement de ces deux vannes, types de vannes, etc. La chaîne cinématique, les alimentations électriques et le contrôle-commande sont des éléments dont la fiabilité doit, le cas échéant, être démontrée.

- Testabilité et maintien dans le temps

Les modalités de testabilité ont également été critiquées dans les EDD, afin de déterminer si elles sont satisfaisantes et à même de garantir la fonctionnalité de la vidange. L'aspect maintenance du dispositif a également été justifié afin de démontrer que la fonctionnalité de la vidange est pérenne.

## 3. SÉCURITÉ LORS DES CHANTIERS

Les ouvrages connaissent dans leur durée de vie des phases de travaux. Le plus souvent, l'objectif de ces travaux est d'améliorer la sûreté de l'ouvrage. Paradoxalement, ce moment singulier, a priori de courte durée par rapport à la durée de vie de l'ouvrage, conduit souvent à une dégradation temporaire de la sûreté de l'ouvrage (structure amoindrie, évacuation des crues limitée).

### 3.1 Bibliographie

Les responsables d'ouvrages accompagnés de leurs bureaux d'études, comme les services de contrôle, ont toujours été vigilants dans ces phases critiques [7]. Les nouvelles réglementations ont permis d'entériner les bonnes pratiques :

- Dans le cadre du dossier de nouvelle autorisation ou de nouvelle approbation pour des travaux envisagés sur un barrage existant ou pour la construction d'un nouvel ouvrage, une étude de dangers est demandée [8]. L'analyse de risques doit y couvrir également la phase chantier ;

- Dans le cas d'un barrage neuf ou reconstruit, l'arrêté technique [2] stipule dans son item 41 de l'annexe 2 que « la conception d'un barrage de classe A prend en considération une situation dite « extrême de batardage » ou de toute autre forme de mise hors service de l'organe d'évacuation des crues le plus capacitif du barrage. Afin d'éviter que cette concomitance d'événements soit à l'origine d'une libération incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue, la probabilité annuelle de dépassement de la cote de danger (cf. 5) pendant la période de neutralisation de l'organe précité n'est pas supérieure à  $3 \times 10^{-4}$  pour un barrage rigide,  $10^{-4}$  pour un barrage en remblai. Le calcul de cette probabilité peut tenir compte de la saisonnalité des crues.  
Il est toutefois admis que le non-dépassement de la cote de danger soit garanti seulement par des mesures d'exploitation compensatoires dont la mise en œuvre est rendue possible par la conception du barrage. À cette condition, le niveau de la retenue à prendre en compte au début de la crue peut être à une cote inférieure à la cote maximale en situation normale d'exploitation (cote de RN) ».

### 3.2 Des bonnes pratiques rencontrées

Certains responsables d'ouvrages accompagnés de leurs ingénieries ont prêté une attention particulière pendant ces phases de chantier à la conservation d'un niveau de sûreté des ouvrages identique à l'exploitation courante en développant des analyses de risques poussées, en étudiant précisément les phases de chantiers critiques pour la sûreté de l'ouvrage, en prenant des précautions quant au possible décalage des phases critiques en cas de retard de chantier sur des périodes à risques hydrologiques plus marqués.

Les moyens utilisés ont pu être variés :

- Dans les cas les plus simples, un creux préventif, jouant sur la capacité de laminage de la retenue ;
- Pour des chantiers prévus sur des durées courtes (moins d'un an), le responsable d'ouvrage a pu programmer les phases critiques de son chantier aux périodes de risques hydrologiques plus faibles et démontrer par une saisonnalisation de l'hydrologie le maintien du niveau de sûreté de son ouvrage ;
- Dans le cas où le niveau de sûreté de l'ouvrage n'a pas pu être maintenu à un niveau identique à celui de l'exploitation courante, le responsable d'ouvrage en lien avec les services de l'État et les collectivités a mis en œuvre un plan d'alerte spécifique pour ces phases critiques de chantier.

## 4. CALCUL DES REVANCHES

L'arrêté technique barrages [2], dans son item 27 de l'annexe I, définit la notion de revanche et prescrit les sollicitations à prendre en compte pour le calcul de cette revanche (reprise des recommandations CFBR [3]) :

« Pour la détermination de la revanche, qui représente la différence de cote entre la retenue et la crête du barrage, éventuellement surmontée d'un dispositif d'atténuation (parapet, pare-vagues, merlon), on considère la plus défavorable des deux configurations suivantes :

- Un vent de période de retour 50 ans sur une retenue à la cote des PHE ;
- Un vent de période de retour 1000 ans soufflant sur une retenue à la cote de retenue normale RN. »

Pour le calcul de la revanche, les bureaux d'études ont utilisé plusieurs méthodes de justifications.

Les données de vents ont été en général obtenues auprès de MétéoFrance (ou autres bases de données). Les caractéristiques retenues ont ainsi pu être analysées en fonction des directions et des intensités associées. En absence de données exploitables, les bureaux d'études ont utilisé les valeurs indiquées dans l'Eurocode 1, Rosa 2000, ou les règles Neige et Vent 65.

La hauteur d'atteinte des vagues sur le parement, quantifiée en termes de run-up, a été déterminée sur la base du fetch et de l'interaction de la vague avec la structure, ce qui détermine la revanche.

Plusieurs méthodes ont pu être utilisées, des recommandations du guide CFBR à des méthodes parfois plus récentes utilisées en maritime. Quelle que soit la méthodologie retenue par l'ingénierie, des pratiques intéressantes ont retenu les taux de franchissement des vagues par-dessus la crête de l'ouvrage suivants [3] :

- 32 % pour les barrages-poids et les voûtes ;
- 13 % pour les ouvrages à parement aval en enrochements ;
- 5 % pour les barrages en remblai, mais aussi pour tous les autres types de barrage pour lesquels un déversement pourrait être préjudiciable (terrain de fondation meuble ou érodable, barrages confortés par un remblai aval, présence de voies d'accès à des organes de sécurité importants).

Comme bonne pratique, certains responsables d'ouvrages ont équipé, en cas de revanches insuffisantes, la crête de leurs barrages par des dispositifs pare-vagues ou parapet. Dans ce cas, une réflexion particulière est néanmoins menée pour déterminer si la construction d'un tel dispositif peut conduire à une réduction significative de la période de retour de la crue amenant la cote du plan d'eau à la cote de danger du barrage. Dans ce cas, l'insuffisance de revanche a pu être traitée par des solutions de confortement.

## 5. ÉTABLISSEMENT DE LA COTE DE DANGER DES OUVRAGES : PRINCIPES ET PRATIQUES

La notion de cote de danger pour un barrage est un critère essentiel pour juger de son niveau de sûreté et évaluer les marges de sécurité par rapport aux situations rares et extrêmes. La première réglementation sur les EDD demandait déjà aux responsables d'ouvrages de se prononcer sur cette cote. Dans la très grande majorité des cas, l'affichage de cette cote résultait d'une démarche forfaitaire inspirée de la pratique des PPI. Or, dans le cadre des EDD des barrages de classe A et B, l'arrêté du 3 septembre 2018 [8] prescrit au maître d'ouvrage de l'établir. La notion de cote de danger n'est pas simple à appréhender. Correspond-elle à un calcul sans aucune marge de sécurité ? La démarche des Eurocodes (états limites ultimes) est-elle applicable ? Est-elle intrinsèque à l'ouvrage ? Ce chapitre prospectif présente donc la pratique, quelques réflexions et les moyens disponibles et déjà utilisés sur ce sujet pour permettre de répondre à la nouvelle réglementation.

### 5.1 Définition

On trouve diverses définitions de la cote de danger dans la réglementation ou les textes rédigés par l'administration. C'est dans une directive du STEEGBH sur les plans particuliers d'intervention, adressée en 1997 aux services de contrôle [9], que le terme est utilisé pour la première fois, définissant la cote de danger comme la « cote de la retenue au-delà de laquelle on considère que le barrage est susceptible de se rompre ». Précisons qu'il était déjà demandé de la justifier, voire de la calculer.

Dans différentes publications lors des colloques CFBR-SHF (2009 et 2017), des définitions très semblables de la cote de danger sont évoquées comme étant « la cote au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs pouvant conduire rapidement à la rupture » [10] et comme « une cote intrinsèque à l'ouvrage, c'est-à-dire sans lien avec une probabilité de l'atteindre. C'est la cote au-delà de laquelle on ne sait plus garantir la stabilité globale du barrage mais où des dégradations peuvent affecter la structure. Ce n'est donc pas nécessairement la cote atteinte pour la crue extrême » [7]

Pour conclure sur la définition qui est communément partagée par la profession, en outre inscrite désormais dans [2] et [8], on retiendra que la cote de danger est la cote à partir de laquelle on ne sait plus garantir la stabilité de l'ouvrage.

Cette définition conduit logiquement à deux critères :

- Un critère « limite » de la stabilité pour lequel le vérificateur est capable d'approcher par calcul le phénomène de rupture du barrage. Cas concret : Vérification d'un barrage-poids en recherchant les conditions d'atteinte d'un coefficient de sécurité égal à 1
- Un critère méthodologique au-delà duquel les méthodes et hypothèses utilisées sont incertaines. C'est la limite de leurs utilisations qui fournira la cote de danger. Cas concret : Recherche de la cote de danger sur un barrage en remblai conduisant à prendre des niveaux d'eau supérieurs à la cote de crête (ou de l'étanchéité). Le vérificateur, n'étant pas suffisamment confiant dans les hypothèses prises et les méthodes employées pour évaluer les conséquences de la surverse sur le parement aval, choisira une cote de danger correspondant à la crête, du fait des limites énoncées ci-avant.

### 5.2 Concept de cote de danger et Eurocodes

Il est tentant de rapprocher les notions de cote de danger et celle d'états limites ultimes au sens des Eurocodes. Bien que les barrages soient exclus du champ des Eurocodes, une comparaison des méthodes de dimensionnement permettrait d'offrir un éclairage utile sur les niveaux d'exigence relatifs de ces référentiels.

Les Eurocodes [11] proposent les définitions suivantes :

- Etats limites de service : états correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées pour une structure ou un élément structural ne sont plus satisfaites ;
- Etats limites ultimes : états associés à un effondrement ou à d'autres formes similaires de défaillance structurale.

On définit alors des situations de projet (ensembles de conditions physiques) au cours desquelles des états-limites ne doivent pas être dépassés.

L'arrêté technique du 6 août 2018 [2] propose une approche similaire et on peut identifier ces **états limites** en rouge et **situations de projet** en bleu :

- Exigence 1° **Dans les conditions normales d'exploitation du barrage, les risques liés à son fonctionnement sont pleinement maîtrisés**, en tenant compte des contraintes pouvant s'exercer naturellement sur l'ouvrage, venant notamment des actions de l'eau de la retenue ;

- Exigence 2° **En cas d'événement naturel exceptionnel** tel que lié à la crue du cours d'eau alimentant la retenue, le barrage conserve la disponibilité de tous ses organes de sécurité. **En cas de séisme**, le barrage n'est pas à l'origine d'une libération incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue.

Des précisions sont apportées dans l'annexe 1 (item 10) : **le barrage ne doit pas subir de dommage**

- Item 33 : **Les diverses situations extrêmes de crue** correspondent à celles à l'occasion desquelles la cote de retenue est inférieure ou égale à la cote de danger de l'ouvrage. **Elles ne conduisent pas à une libération incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue.** »

Pour autant, une comparaison plus poussée s'avère délicate. En effet, les vérifications des ouvrages aux différents états limites aux Eurocodes se font par le biais de jeux de coefficients de sécurité (appliqués sur les résistances et les sollicitations) permettant d'assurer la tenue des ouvrages avec des marges de sécurité suffisantes. La figure 2 présente ces différents coefficients de sécurité et leurs notations.

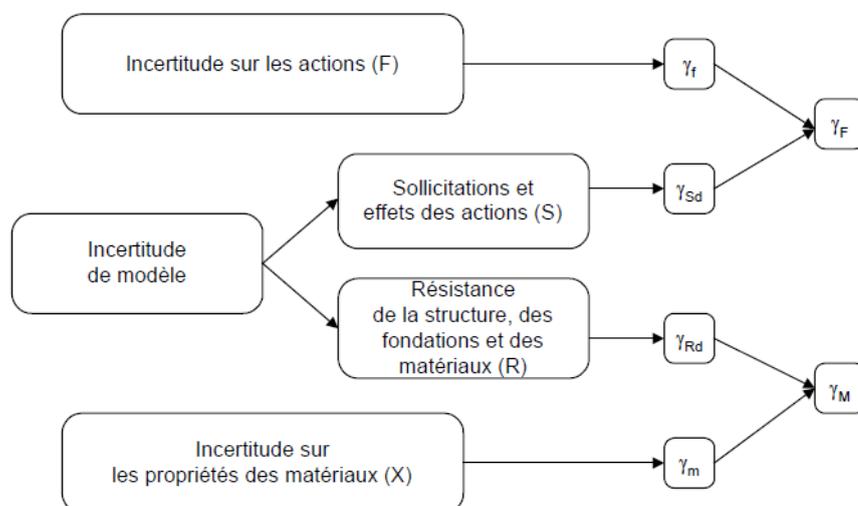


Figure 2 : Coefficients partiels Eurocodes [11]

Dans les Eurocodes, les coefficients partiels et de modèle proposés pour la justification des structures visent à atteindre un niveau de fiabilité défini par un indice de fiabilité  $\beta$ , traduisant les marges de sécurité entre la situation probable de la structure face à une sollicitation et la situation pour laquelle la structure est (ou devrait être) dimensionnée. Cet indice de fiabilité  $\beta$  dépend de la classe de conséquence associée à l'ouvrage (CC1, CC2 et CC3 pour respectivement des conséquences faibles, moyennes et élevées) [11].

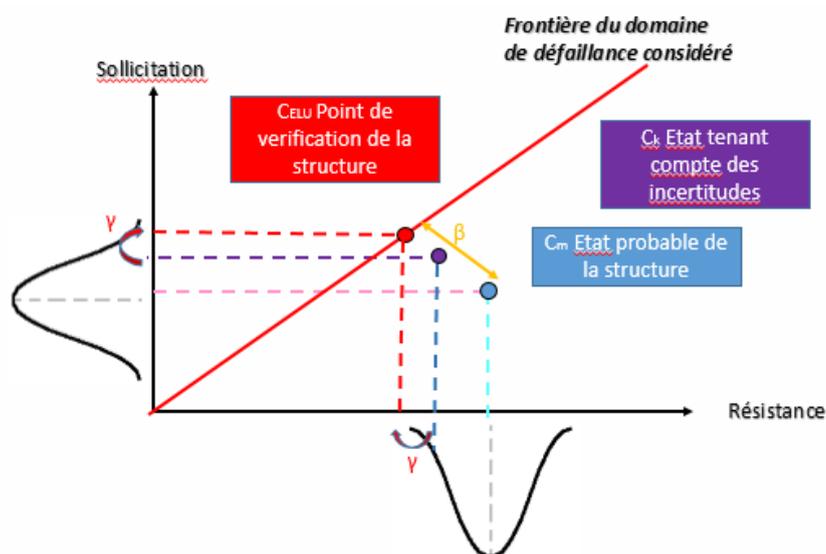


Figure 3 : Illustration de l'indice  $\beta$

Si on applique cette approche en accord avec l'Eurocode 0 [11], l'indice de fiabilité d'une structure telle qu'un barrage (conséquences élevées en cas de défaillance, classe CC3) devrait conduire à une probabilité annuelle de défaillance à l'Etat Limite Ultime de  $10^{-7}$  (sous condition d'une loi normale sur les distributions des sollicitations et des résistances).

Dans le domaine des barrages, alors que la notion de cote de danger suppose l'absence de coefficient de sécurité (puisqu'on ne peut plus garantir la stabilité au-delà de cette situation), le calcul est néanmoins réalisé en conservant des valeurs caractéristiques sur les propriétés des matériaux, traduisant des incertitudes liées à leur détermination et leur caractère inhomogène. De même, il arrive que des coefficients de modèle soient conservés.

La fiabilité selon les Eurocodes est déterminée à partir de deux points de fonctionnement : celui de l'état probable basé sur des valeurs moyennes et celui du point de vérification de la structure après le choix des valeurs caractéristiques et l'application de coefficients partiels. L'indice de fiabilité est donc la distance entre ces deux états dans le diagramme Résistance / Sollicitation (Figure 3).

S'il on tente de comparer un niveau de sûreté d'un barrage avec un indice de fiabilité au sens des Eurocodes, on peut prendre l'exemple de la rupture en cisaillement d'un barrage poids en crue (sans surverse). La détermination du niveau de sûreté en crue vis-à-vis de ce scénario va conduire à examiner différents scénarii de crues de probabilités faibles pour connaître la tenue de l'ouvrage jusqu'à la cote de danger. Les hypothèses sur les résistances pour conduire ces études se font (si l'étude est bien construite) à partir des valeurs caractéristiques et non à partir des valeurs moyennes. A titre d'exemple, pour un barrage pour lequel la cote de danger serait atteinte pour une crue de probabilité  $10^{-5}$  et compte-tenu des valeurs caractéristiques sur les résistances prises habituellement (de l'ordre de deux fois l'écart type), la probabilité annuelle de défaillance se situe entre  $10^{-6}$  et  $10^{-7}$ . Pour cet exemple là, cela rejoindrait les probabilités cibles fixées dans les Eurocodes pour ces types d'ouvrage.

Si ce développement est commode à réaliser sur les scénarios de défaillances en crue sans surverse, il l'est beaucoup moins sur des mécanismes moins quantifiables telles que les ruptures par érosion interne ou par surverse. En effet, pour le mécanisme de surverse d'un barrage en remblai par exemple, la fiabilité du barrage est essentiellement associée à la fréquence de la crue qui provoque la surverse car les propriétés de résistance à l'érosion externe et la cinétique des phénomènes sont actuellement trop peu connues pour être prises en compte dans l'évaluation de l'indice de fiabilité. De plus, la comparaison est théoriquement délicate et doit rester "en ordre de grandeur" car les incertitudes et les lois de probabilité des paramètres peuvent être très différentes dans le domaine du génie civil "traditionnel" et celui des barrages. On souligne au passage que ces approches fiabilistes font apparaître l'importance des incertitudes (sur les sollicitations et sur les résistances), vis-à-vis du niveau de fiabilité obtenu, comme le montrent d'ailleurs [15], [16] et [17].

### 5.3 Une cote de danger intrinsèque à l'ouvrage ?

Compte tenu du fait que le chargement hydrostatique est bien souvent très majoritairement dimensionnant, la cote de danger apparaît comme étant intrinsèque à l'ouvrage. En réalité, les conditions d'application de la sollicitation peuvent avoir une influence significative sur la tenue de l'ouvrage :

- Les raffinements des méthodes de justification, en particulier, sur les barrages-voûtes, conduisent à tenir compte des effets thermiques et à aboutir à des cotes maximales admissibles qui dépendent de la saison ou qui seront explicitement conditionnées à une saison ;
- Lorsqu'on s'intéresse à des mécanismes de rupture par érosion externe, la hauteur de déversement seule ne suffit pas à présumer de la tenue ou non de l'ouvrage. La durée de déversement est un paramètre également important ;
- Le niveau d'eau à l'aval de l'ouvrage, qui peut par exemple influencer les sous-pressions au sein du barrage, peut également avoir un impact significatif sur le niveau d'eau à l'amont que le barrage est capable de retenir.

Ainsi, en toute rigueur, il apparaît que le seul paramètre « hauteur d'eau à l'amont » ne suffit pas à définir totalement la sollicitation maximale à laquelle l'ouvrage est intrinsèquement capable de résister.

Pour autant, il apparaît bien souvent que ces autres paramètres de sollicitation sont très étroitement liés au niveau d'eau amont, rendant bien compte de la situation la plus défavorable pour l'ouvrage et justifiant cette notion de cote de danger intrinsèque à l'ouvrage :

- Concernant l'érosion externe, la démarche actuelle de dimensionnement des ouvrages est le plus souvent de considérer un hydrogramme de référence, et de proposer des hydrogrammes homothétiques à partir de cette référence et des évaluations des débits maximaux. Ainsi la durée de déversement est directement liée à la cote maximale atteinte ;
- De même, les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage ont, dans l'immense majorité des cas, une origine commune : la crue. Ainsi, le niveau aval est directement corrélé au niveau amont.

Ainsi, on peut voir que si le caractère intrinsèque de la cote de danger n'est pas totalement vérifié, dans un bon nombre de cas il reste possible de décrire la situation de sollicitation la plus préjudiciable pour l'ouvrage à l'aide de ce seul paramètre. Dans les autres cas, il sera plutôt pertinent de définir, au cas par cas, les différentes « situations de danger » et déterminer la plus probable.

## 5.4 Une cote de danger calculable ?

Dans le cadre des EDD des barrages de classes A et B, l'arrêté du 3 septembre 2018 [8] prescrit au responsable de l'ouvrage d'établir cette cote de danger, incitant à conduire une réflexion sur la cote de danger de l'ouvrage concernée par l'EDD. Cela rompt avec les pratiques antérieures qui consistaient à considérer des valeurs forfaitaires en fonction des types d'ouvrages.

Hormis les cas de surverse par-dessus la crête de l'ouvrage où le raisonnement sera plutôt qualitatif et/ou sur la base de méthodes innovantes sur l'estimation de l'érosion à l'aval des ouvrages, comme cela a pu être vu dans certaines études, des calculs ont été réalisés sur certains barrages pour déterminer la cote de danger. Par exemple, sur un barrage-poids, il est aisé de conduire un calcul en augmentant progressivement le niveau d'eau jusqu'à atteindre les facteurs de sécurité égaux à 1.

Cette recherche de la cote de danger doit amener le responsable d'ouvrage et son ingénierie à examiner l'ensemble des mécanismes de défaillance et à retenir le plus probable et réaliste pour l'établissement de la cote de danger retenue.

## 6. LES MÉTHODES DE JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ DES OUVRAGES

Par les sollicitations des services de contrôle sur les études de stabilité ou de comportement d'ouvrage, le BETCGB a l'occasion de constater la diversité des pratiques en matière de modélisation. Les éléments indiqués dans les paragraphes suivants sont des bonnes pratiques qui ont été mises en œuvre et qui ont permis d'améliorer la qualité des justifications, des modélisations et de la présentation de leurs résultats.

### 6.1 Le chargement à appliquer dans les modèles

Les cas de charge à appliquer aux modèles utilisés sont en partie précisés par l'arrêté technique barrage [2] depuis aout 2018. Cet arrêté n'étant pas exhaustif, certaines études ont utilisé d'autres combinaisons d'actions (notamment celles des recommandations CFBR) pour justifier de manière pertinente les conditions de stabilité de certains ouvrages.

L'arrêté technique barrage fixe les conditions dites « normales » d'exploitation de l'ouvrage. Il est notamment spécifié qu'en situation courante, le plan d'eau peut varier entre la CME et RN. Par conséquent, pour satisfaire aux exigences essentielles de sécurité, les sollicitations de nature non hydraulique, ne se cumulant pas à la survenue d'une crue, doivent être examinées avec un plan d'eau initialement à RN, ce qui est la pratique courante, mais aussi avec une cote initiale correspondant à la CME. Un tel cas de charge peut en effet revêtir un caractère dimensionnant. Par exemple, pour un ouvrage sensible thermiquement, des études tenant compte d'un plan d'eau au niveau de la CME couplé avec des conditions thermiques courantes ou rares ont permis de statuer sur la possibilité d'ouverture de fissures, par exemple en pied aval pour une voûte mince. De même, la stabilité vis-à-vis d'un événement sismique a pu être étudiée selon deux hypothèses : un plan d'eau à RN et un plan d'eau à la CME.

L'administration a pu constater que la définition des conditions aux limites imposées pour les différents cas de charge était présentée de manières diverses dans les notes de calcul examinées. Par exemple, une bonne pratique relevée est que le chargement appliqué par la retenue (sur le barrage, sur le fond de la retenue...) a été détaillé. Il en est de même sur les conditions de chargement thermique, en particulier le coefficient de dilatation thermique choisi et le régime choisi (permanent, transitoire).

S'agissant de la prise en compte des sous-pressions dans les notes de calculs, les recommandations CFBR pour le calcul des barrages-poids ou voûtes [11] [12] indiquent qu'il est possible de tenir compte de l'auscultation pour justifier un éventuel rabatement des sous-pressions. Toutefois, il est également précisé que les éventuels dispositifs de drainage et voile d'injection peuvent, en raison du vieillissement, perdre en efficacité. De plus, les données d'auscultation collectées correspondent à des niveaux de retenue courants. Le comportement de la piézométrie en situations rare ou extrême reste par conséquent inconnu. Certaines notes de calcul ont prudemment proposé un calcul sans rabatement. Une autre pratique rencontrée et à recommander est d'effectuer une étude de sensibilité du coefficient de rabatement et de proposer des hypothèses plausibles d'extrapolation des sous-pressions pour des cas de charges jamais rencontrés (PHE, voire RN sur certains ouvrages), pour identifier un éventuel effet de seuil qui pourrait conduire à la ruine de l'ouvrage.

### 6.2 Lois de comportement et critères de rupture

Les recommandations du CFBR sur les barrages-poids, voûtes et remblais [11] [12] [13] détaillent précisément l'intérêt de recourir à des valeurs caractéristiques de résistance des matériaux en lieu et place de simples valeurs moyennes. En particulier si le nombre d'essais est faible, le jugement d'expert y est fortement recommandé. Un certain nombre d'études suivent la prudence de ces recommandations en ne considérant pas les valeurs moyennes et discutant de la représentativité des essais pratiqués ainsi que de leur dispersion éventuelle.

Nous avons pu examiner des études dont le choix des valeurs caractéristiques s'est appuyé sur (i) des imageries de paroi permettant d'évaluer les discontinuités (que les essais en laboratoire peuvent difficilement qualifier), (ii) les données relatives à la méthode de prélèvement (vitesse et couple du carottier), (iii) une distribution spatiale judicieuse des investigations sur le barrage (par exemple conduisant à plusieurs sondages sur les plots d'un barrage-poids, dont un par plot a minima...), (iv) des valeurs finales retenues avec prudence en particulier sur les paramètres fragiles telle que la résistance à la traction) qui

prennent en considération la méthode de mesure (par exemple l'essai de fendage surestime la résistance à la traction des échantillons composés de gros granulats). Ces exemples sont à encourager de façon générale.

Dans une optique de présentation claire des hypothèses, les lois de comportement (pour décrire les matériaux, leurs pathologies, les éléments d'interfaces...) utilisées ont été décrites et précisées très clairement dans des études de stabilité, en particulier quand des lois de comportement non linéaires, mêlant élasticité, critères d'endommagement et plasticité, interviennent dans les modèles. La rhéologie adoptée pour modéliser le matériau relève, en effet, des hypothèses du modèle. Il apparaît donc justifié à ce titre qu'elle soit clairement exposée ainsi que l'intégralité des paramètres numériques associés. Parfois, les notices détaillant les lois de comportement utilisées ainsi que leurs formulations ont été jointes aux notes de stabilité.

Le calage d'un modèle de type éléments finis, tel que réalisé classiquement, consiste notamment à ajuster le module d'Young du matériau béton et du matériau rocher. Toutefois, ces paramètres ont une réalité physique et peuvent être mesurés ou comparés à des valeurs de référence (au moins en ce qui concerne le matériau béton). Ainsi, il est aisé de confronter le module trouvé par le calage aux valeurs de la littérature, voire à des essais expérimentaux faits sur des carottes. Certes, le module calé par l'auscultation traduit un module à l'échelle de l'ouvrage alors que ceux obtenus à partir des carottes caractérisent le comportement plus local du béton. Néanmoins, une telle démarche vise à caractériser le degré de représentativité du modèle numérique construit par l'ingénieur vis-à-vis de la réalité physique de l'ouvrage qui intègre souvent un degré supérieur de complexité (moindre qualité de clavage, dégradation, respiration de fissures plus ou moins prononcée...). La différence entre les modules de référence et ceux issus de calage numérique permettrait de quantifier l'importance de ces éléments complexes dans la réponse de la structure, et constituerait donc un bon indicateur vis-à-vis de la nécessité de recourir ou non à une modélisation plus fine.

Le BETCGB note aussi que pour une meilleure représentativité du comportement de l'ouvrage et de sa fondation, certaines études ont appliqué des modèles orthotropes à la fondation, conduisant à des analyses expertes intéressantes du comportement des ouvrages.

### 6.3 Modèles utilisés

Sur un plan général, le BETCGB constate que les modèles utilisés par les ingénieries répondent correctement aux problématiques posées. Nous formulons quelques remarques :

- Pour le calcul des barrages-voûtes, la plupart des notes exposent leur méthodologie de calage permettant d'objectiver la vraisemblance du modèle (linéaire, puis, le cas échéant, non-linéaire) et sa sensibilité ;
- S'agissant du gonflement, les calages des modèles restent difficile à réaliser. Néanmoins, nous remarquons que ce sujet fait l'objet de travaux prometteurs, déjà mis en œuvre dans certaines études ;
- Cependant, les modèles hydrauliques visant à estimer le champ de pression dans un barrage en remblai ou dans une fondation sont relativement peu utilisés dans la mesure où pour les ouvrages existants l'auscultation permet d'accéder à cette donnée (avec la précaution faite auparavant quant à l'extrapolation des données mesurées et analysées). Dans ce cas seule une étude de sensibilité permet d'objectiver les marges de sécurité.

### 6.4 Post-traitement

Les modes de transmission actuels des résultats sont majoritairement présentés dans des rapports « papiers ». Avec les possibilités techniques modernes, quelques bureaux d'études ont déjà fourni des représentations tridimensionnelles numériques de fondations ou de barrage, ce qui ouvre la voie à la transmission des résultats au format numérique, solution qui est d'une grande valeur, permettant de mieux visualiser et analyser les résultats.

Globalement, la plupart des ingénieries représentent les rosettes de contraintes sur les parements amont et aval des ouvrages et les forces résultantes : ce sont des bonnes pratiques à souligner, pour bien visualiser les résultats.

Le post traitement fait l'objet d'analyses, comme la justification a posteriori de l'emplacement de non-linéarités positionnées a priori. Cela peut par exemple correspondre à une analyse des contraintes dans les éléments linéaires de la structure (vérification dans le plan de Mohr que le critère de Mohr-Coulomb n'est pas dépassé et que les tractions restent acceptables) ou d'une comparaison entre l'état de traction / compression en parements aval et amont. Cette seconde démarche permet en effet de juger de l'extension amont / aval de la zone du béton sollicitée en traction.

## 7. CONCLUSIONS

L'examen des études de dangers nombreuses et diversifiées et des études afférentes (hydrologie, hydraulique, stabilité, auscultation...) par le BETCGB et plus généralement par l'appui technique national aux services de contrôle (BETCGB et IRSTEA), a permis d'identifier plusieurs bonnes pratiques rencontrées. Avec les progrès techniques des ingénieries au cours de la dernière décennie et face aux enjeux de sûreté auxquels est confrontée la profession, ces pratiques sont naturellement à encourager pour perfectionner la démonstration de la sûreté de leurs ouvrages, dans le cadre de la nouvelle réglementation.

## REMERCIEMENTS

Le BETCGB remercie l'IRSTEA pour la relecture attentive et constructive de cet article et pour sa participation active dans la mission d'Appui Technique National et d'animation des services de contrôle dans les DREAL.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques
- [2] Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des ouvrages
- [3] CFBR (2013), Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages
- [4] CFGB-Cemagref (1997), Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi
- [5] CIGB (1984) Bulletin 49 « Exploitation des ouvrages hydrauliques de barrages »
- [6] BETCGB (2002), Guide de contrôle des barrages en exploitation
- [7] Bizard K, Schriqui C, Toniolo C, Aigouy S, Dieudonné S, Prevot G, Expériences des Services de Contrôle concernant la sûreté hydraulique des barrages, colloque CFBR 2016, Chambéry
- [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
- [9] Courrier du chef du STEEGB aux directeurs régionaux de l'industrie de la recherche et de l'environnement, sur les plans particuliers d'intervention, en date du 17/10/1997
- [10] Royet P, Degoutte G, Peyras L, Lavabre J, Cotes et crues de protection, de sûreté et de danger de rupture, La houille Blanche, 2010.
- [11] Eurocode 0, NFEN1990, mars 2003
- [12] CFBR (2012), Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids
- [13] CFBR (2018) Recommandations pour la justification du comportement des barrages voûtes existants
- [14] CFBR (2015), Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai
- [15] Kreuzer H, Leger P, The Adjustable Factor of Safety: A reliability-based approach to assess the factor of safety for concrete dams, Hydropower & Dams Issue One, 2013
- [16] Lacasse S, Höeg K (2019), Reliability and risk approach for design and safety evaluation of dams, ICOLD, Symposium 2019, Ottawa
- [17] Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Becue JP., Royet P. 2010, Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 201 p.