

APPROCHES APPROFONDIES POUR LA JUSTIFICATION AU GLISSEMENT DES BARRAGES EN REMBLAI EXISTANTS: ELEMENTS DE JUSTIFICATION ET DE DECISION

*Advanced justification approaches against sliding for existing
embankment dams: justification and decision elements*

Olivier BORY, Jean-Robert COURIVAUD, Nicolas LEBRUN

EDF CIH, 4, allée du Lac de Tignes 73290 La Motte Servolex;

olivier.bory@edf.fr ; jean-robert.courivaud@edf.fr ; nicolas-nicolas-jean-claude.lebrun@edf.fr

MOTS CLEFS

Barrage en remblai, Stabilité au glissement, Etude de sûreté

KEY WORDS

Embankment dam, Static slope instability, Safety analysis

RÉSUMÉ

La justification des barrages en remblai vis-à-vis du risque de glissement sous sollicitation statique est une exigence réglementaire. Si les résultats de calcul à l'équilibre limite sont des éléments de jugement, l'article invite à prendre du recul pour certains ouvrages existants, et explore d'autres arguments pouvant moduler ces résultats et contribuer à la démonstration. Un exemple fictif est proposé, permettant de faire le lien avec les analyses des risques des EDD.

ABSTRACT

The justification of embankment dams to the risk of sliding under static loading is a regulatory requirement. While the results of limit equilibrium calculations are used as a basis for judgement, the article invites to take a step back for certain existing structures, and explores other arguments that could modulate these results and contribute to the demonstration. A fictitious example is developed, to illustrate the risk analyses of Safety Evaluation Analyses.

1. INTRODUCTION

1.1. Le cadre réglementaire

La justification de la tenue des grands barrages est une exigence administrative en France depuis l'instauration en 2007 du cadre réglementaire [1], demandant notamment pour les ouvrages concernés la réalisation d'une Etude De Danger (EDD) selon les prescriptions de l'Arrêté Technique Barrage publié en 2018 [2].

Pour le cas des barrages en remblai, la justification passe par l'analyse des trois modes de rupture : le glissement par cisaillement, l'érosion interne et l'érosion externe.

Le présent article se concentre sur la justification au glissement. La bibliographie comprend de nombreuses méthodes et méthodologies éprouvées, dont celle préconisée par le CFBR [3]. Pour l'état-limite ultime de stabilité d'ensemble (glissement), les recommandations proposent d'évaluer la stabilité par calcul.

1.2. Le paradoxe de certains ouvrages anciens

L'étude de stabilité des barrages en remblai, notamment anciens, n'est pas toujours disponible (archives incomplètes ou perdues), ou réalisée selon un référentiel obsolète.

Pour répondre aux récentes exigences réglementaires, il peut alors être nécessaire de produire une étude de stabilité du barrage. Le maître d'ouvrage devra alors missionner un bureau d'études agréé pour la réaliser. Si les données historiques sont lacunaires ou incertaines, des reconnaissances seront alors requises pour élaborer les modèles de l'ouvrage. Conformément aux recommandations du CFBR [3], l'ingénieur fixera alors des valeurs raisonnablement conservatives pour les paramètres.

Il est déjà apparu sur des ouvrages anciens, dont les pentes des talus aval pouvaient parfois être raides, que les résultats des calculs de stabilité n'atteignaient pas les valeurs proposées par le CFBR, amenant à douter quant à la robustesse de ces ouvrages vis-à-vis de ce mode de rupture. Pourtant leurs comportements, constatés depuis de nombreuses années par un dispositif d'auscultation et une surveillance rigoureuse et régulière, pouvaient avoir été jugés satisfaisants. Et ce même lors des nombreuses épreuves de chargement, faisant office de test de robustesse. Par ailleurs l'analyse statistique des ruptures de barrage menée par le Comité Technique « sûreté » de la CIGB [4] a montré la très faible occurrence de ce mode de rupture, notamment pour les ouvrages modernes (surtout après 1950), et au-delà du jeune âge (plus de 2/5 ans après la fin de la mise en eau).

Quel jugement adopter pour de tels cas ? Est-il acceptable de se satisfaire de résultats de calcul moins exigeants que ceux proposés par les recommandations, le cas échéant sous quelles conditions ?

L'article explore différents éléments de réflexion pouvant nourrir ce type de démonstration.

2. RAPPEL DES RECOMMANDATIONS CFBR

Le CFBR a publié en 2015 des recommandations [3] pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Ces recommandations invitent à adopter le format des méthodes semi-probabilistes aux état-limites, à l'instar des Eurocodes. Cette démarche examine successivement : les situations de projet, les actions et leurs combinaisons, les résistances des matériaux, les états-limite et leurs conditions de justification.

En particulier pour l'état-limite ultime de stabilité d'ensemble (glissement), il est proposé d'évaluer la stabilité par calcul à l'équilibre, cas le plus fréquent. La condition d'état-limite compare le rapport des forces résistantes sur les forces motrices, et le coefficient de modèle.

La sécurité du calcul réside dans les points ci-dessous :

- choix des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques « raisonnablement conservatives » ;
- application des coefficients partiels sur les valeurs caractéristiques ;
- application d'un coefficient de modèle.

Les coefficients partiels et de modèle proposés (hors cas particulier des barrages en enrochements à masque amont) sont les suivants :

Situations	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \varphi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
rare de crue	1,2	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrêmes de crue, sismique ou autres	1	1	1,1

Figure 1 : Les coefficients partiels et de modèle pour l'ELU de stabilité d'ensemble (glissement) – extrait de [3]

Par exemple pour la situation normale d'exploitation, le Facteur de Sécurité global recommandé est :

$$F_s = 1,25 \times 1 \times 1,2 = 1,5$$

Modulations ou compléments des recommandations pour les ouvrages existants

Si la démarche adoptée par les recommandations de 2015 du CFBR pour la justification des ouvrages est similaire à celle retenue par les Eurocode (approche semi-probabiliste avec définition de valeurs caractéristiques et de coefficients partiels), il existe néanmoins une nuance dans leur périmètre d'application respectifs. En effet, les Eurocodes sont produits en déclinaison de la directive du Conseil 89/106/CEE qui concerne en premier lieu la conception et la réalisation d'ouvrages neufs (de bâtiments et de génie-civil). Les recommandations du CFBR, s'appliquent, elles, aussi bien à la conception d'ouvrages neufs, qu'à la justification d'ouvrages existants.

Le paragraphe 4.4.4 des recommandations [3] ouvre cependant la porte à des modulations ou compléments pour les ouvrages existants :

« Pour certains ouvrages existants conçus à l'origine avec des coefficients de sécurité déterministes moins exigeants en situation normale d'exploitation que ceux proposés dans les recommandations, le respect des recommandations peut ne pas être atteint alors même que le comportement de l'ouvrage est jugé tout à fait satisfaisant sur le plan de l'auscultation et de l'absence de pathologie. Pour ces ouvrages dont la justification de la stabilité ne pourrait être faite par un calcul à l'équilibre limite, il peut être envisagé une approche plus approfondie de justification, dont l'objectif est d'apporter la preuve de la justification de la stabilité de l'ouvrage.

[...]

Cette démonstration alternative de la sécurité doit reposer sur une argumentation solide, détaillée, quantifiée, et capable de démontrer que le niveau global de sécurité est satisfaisant. La profondeur de l'analyse de risques sera proportionnée à l'écart entre les résultats des justifications par un calcul à l'équilibre limite et les coefficients de modèle recommandés et proportionnée aux enjeux aval. »

Les approches approfondies, notamment pour déroger aux Facteurs de Sécurité proposés, sont donc autorisées, mais doivent être solidement étayées. Le prochain paragraphe vise à développer quelques éléments pour alimenter ce type d'analyse.

3. ELEMENTS DE JUSTIFICATION POUR UNE APPROCHE APPROFONDIE

3.1. Retour d'expérience accidentologique

Le recensement et le retour d'expérience des accidents et incidents de barrage ont fait l'objet de nombreuses publications et analyses. On peut citer notamment [3], [4], [5], [6] et [13].

Les trois principaux modes de rupture des barrages en remblai sont l'érosion externe, l'érosion interne, et le glissement, mais ce dernier ne représente qu'un pourcentage minime, de l'ordre de 5 %.

Pour le glissement sous sollicitation statique, on peut notamment retenir que les ruptures :

- sont très minoritaires par rapport aux phénomènes d'érosion ;
- ont lieu très majoritairement lors de la mise en eau ou à jeune âge (< 10 ans) ;
- concernent en premier lieu les ouvrages très anciens (avant 1950) ou avec des conceptions inadaptées (absence ou sous dimensionnement de barrières comme l'étanchéité, le drainage, la filtration, ...) ;
- touchent plus fréquemment les remblais mal compactés ;
- présentent très souvent des indices décelables précocement par une surveillance adaptée (auscultation, inspections...) ;
- impliquent parfois des ouvrages où la maintenance était manifestement insuffisante.

La réciproque peut aussi être constatée : un remblai construit après 1950 selon les règles de l'art (correctement compacté et avec des barrières bien positionnées et dimensionnées), en exploitation à niveau normal depuis plusieurs décennies, doté d'un dispositif d'auscultation et d'une surveillance conformes aux guides de la profession, et faisant l'objet d'une maintenance suffisante... n'a pratiquement aucune chance (statistiquement) de connaître une rupture par glissement sous sollicitation statique.

3.2. Mécanisme de rupture par glissement et situation de calcul

De manière simplifiée, il peut être considéré qu'une rupture par glissement peut se produire dès lors que l'inégalité suivante, en contraintes effectives, n'est plus vérifiée le long d'une surface de cisaillement dans l'ouvrage et/ou sa fondation :

$$\tau < (\sigma_n - u) \times \tan \phi' + c'$$

Avec τ la contrainte tangente à la surface, σ_n la contrainte totale normale à la surface, u la pression interstitielle au niveau de la surface, ϕ' l'angle de frottement effectif du matériau et c' sa cohésion effective.

Pour qu'un ouvrage stable connaisse une rupture en cisaillement, il est donc nécessaire qu'au moins un des paramètres puisse évoluer.

Les paramètres τ et σ_n caractérisent l'état de contrainte dans l'ouvrage. Ils peuvent évoluer en situation sismique, ou de crue par exemple, mais ces situations ne correspondent pas à la situation normale d'exploitation. En situation normale d'exploitation, par définition, il n'est généralement pas légitime de considérer que l'état de contraintes totale peut significativement évoluer en dehors des domaines déjà vécus par l'ouvrage. Nous soulignons par ailleurs que dans le cadre d'une étude de danger, associée à une étude de conformité à ATB, les situations pouvant conduire à une modification de l'état de contrainte dans l'ouvrage, sont étudiées en parallèle de la situation normale d'exploitation.

Les paramètres ϕ' et c' caractérisent la résistance au cisaillement intrinsèque du matériau. Leur évolution peut être consécutive d'un vieillissement des matériaux du remblai ou de la fondation. Ce vieillissement peut par exemple être causé par des mécanismes d'érosion interne (suffusion notamment) ou de dessiccation pour la partie superficielle. Là encore l'étude de l'ouvrage doit permettre de déterminer si ces phénomènes sont susceptibles de se produire ou non, en particulier en situation normale.

Le paramètre u caractérise le rôle de l'eau dans l'équation. Les pressions interstitielles peuvent évoluer au-delà du comportement normal de l'ouvrage, dans des situations rares ou exceptionnelles (précipitations et/ou crue exceptionnelle, défaut d'étanchéité, de drainage) mais qui ne concernent pas la situation normale d'exploitation et qui sont étudiées dans le cadre d'une étude de danger et de conformité à l'ATB. Les pressions interstitielles peuvent aussi connaître une évolution lente, pouvant être considérée comme normale, dans certains ouvrages pathologiques, mais une auscultation conforme aux règles de l'art doit permettre de le détecter.

L'évolution des pressions interstitielles, peut également modifier la succion et donc la cohésion capillaire apparente en zone non saturée, mais une étude négligeant ces phénomènes est conservatrice vis-à-vis de ce point.

La rupture du barrage d'Edenville en 2020 [17], est une illustration récente et bien documentée de rupture par instabilité mécanique d'un barrage ancien, construit dans les années 1920. Elle correspond à un cas de liquéfaction statique en situation de crue et d'intenses précipitations sur l'ouvrage, et pas en situation normale d'exploitation, dans lequel l'évolution des pressions interstitielles, mais aussi du champ de contraintes totales, ont joué un rôle prépondérant dans la rupture du barrage. Les mécanismes en jeu sont également caractéristiques de certains matériaux spécifiques (sol pulvérulents lâches, pouvant montrer un effondrement fragile).

3.3. Discussion sur le coefficient de modèle et les coefficients partiels

- Valeur du coefficient de modèle ?

Le coefficient de modèle permet de couvrir les incertitudes des différents modèles de l'ouvrage : géométrique, géologique, géotechnique, et hydraulique.

Pour un ouvrage ou une situation projetés, cela permet ainsi de se protéger d'un éventuel écart entre une représentation ou une simulation théorique de l'état de l'ouvrage réalisée à partir des modèles et la réalité qui pourrait être un peu différente.

Pour un ouvrage existant, à condition d'avoir rassemblé et fiabilisé un certain nombre d'informations, les incertitudes sur les modèles peuvent être très faibles :

- un modèle géométrique basé sur des données topographiques récentes et rigoureuses ;
- un modèle géologique et géotechnique basé sur des reconnaissances de construction et/ou post-construction cohérentes et en quantité suffisante ;
- un modèle hydraulique calé sur des données d'auscultation fiables et représentatives.

Dès lors, il n'apparaît pas déraisonnable de considérer une marge (valeur du coefficient de modèle) différente pour les ouvrages existants bien connus, et les ouvrages projetés ou insuffisamment décrits.

- Valeurs des coefficients partiels ?

Les coefficients partiels sur les paramètres géotechniques γ_m , c' et $\tan \varphi'$ permettent de se couvrir des incertitudes sur leurs valeurs.

Or les incertitudes ne sont plus les mêmes entre un ouvrage projeté où ces valeurs doivent intégrer de potentiels écarts entre le projet et la réalisation, et un ouvrage existant avec sa fondation dont on dispose d'une caractérisation approfondie des propriétés, issue de nombreuses données de contrôle de construction éventuellement complétées par des campagnes de reconnaissances.

Par ailleurs, le coefficient de modèle s'appliquant aussi au modèle géotechnique, il se cumule aux coefficients partiels sur les paramètres géotechniques.

Enfin, les paramètres géotechniques ayant été fixés de manière « raisonnablement conservatrice » selon les recommandations, on cumule encore des marges de sécurité supplémentaires.

Il ne semble également pas déraisonnable de questionner la marge de 25 % sur les propriétés géotechniques lorsque l'analyse d'un ouvrage en place s'appuie sur des données nombreuses, fiables et cohérentes.

3.4. Modélisations détaillées

La méthode usuelle : le calcul d'équilibre limite et le facteur de sécurité

Les calculs d'équilibre limite sont à la base du dimensionnement et de la vérification des barrages en remblai, grâce notamment à la simplicité d'emploi de la méthode et la rapidité de calcul, mais aussi par la commodité d'usage du facteur global de sécurité. [14].

Les méthodes approfondies : le calcul des déformations et les seuils de comportement

Les modèles numériques aux éléments finis permettent de simuler plus finement le comportement des structures. Ils utilisent des lois de comportement de complexité croissante : de l'élasto-plastique de Mohr-Coulomb (années 60), à la loi hyperbolique de Duncan-Chang (années 70), aux lois élasto-plastiques avec écrouissage et plusieurs surfaces de charge (Cam-Clay, Prevost, Hujeux dans les années 80).

Ces approches sophistiquées permettent d'explorer rigoureusement les conservatismes des approches usuelles par des simulations fines des phénomènes.

En particulier, la modélisation des sols non saturés est un axe important pour expliquer les conservatismes pour les ouvrages présentant un rabattement hydraulique. Différentes approches existent. On peut citer en particulier trois modèles basés sur l'application du principe des contraintes effectives dans le domaine de la non-saturation : le modèle de Taibi (1994), le modèle de Lu (2014) et enfin le modèle de l'ANR Terredurable (2019). Un exemple d'application de ces trois modèles sur un remblai de canal en sol fin a été publié [16], proposant une caractérisation du critère de rupture pour un remblai non saturé en condition normale d'exploitation, ouvrant la porte à ces approches pour les études de stabilité.

3.5. Conception et construction

Une conception sûre est un premier pilier de la sûreté des barrages. Elle passe par un dimensionnement et une réalisation conforme aux règles de l'art professionnelles, dont la littérature est abondante et non décrite ici.

On peut rappeler néanmoins quelques grands principes :

- positionner et dimensionner correctement les barrières de l'ouvrage (étanchéité, drainage, filtration, ...)
- purger ou traiter les matériaux inadéquats, pour les remblais comme pour les fondations ;
- adopter un zonage pour optimiser les matériaux disponibles ;
- contrôle des écoulements ;
- contrôle à la mise en œuvre (teneur en eau, compactage, pressions interstitielles, ...)
- ...

Une bonne conception et réalisation est évidemment une très bonne protection contre le risque de glissement.

3.6. L'efficacité de l'association surveillance et intervention

Une surveillance et une exploitation sûres constituent un second pilier de la sûreté des barrages. La réglementation française exige que ces activités soient décrites dans plusieurs documents, avec des périodicités dépendant de l'activité et de la classe du barrage :

- le registre du barrage et le document d'organisation ;
- le rapport périodique d'exploitation et de surveillance et les visites techniques approfondies ;
- le rapport d'auscultation.

La surveillance des barrages a fait l'objet de très nombreuses communications et recommandations. On peut citer notamment les bulletins de la CIGB [7], [8], [9], [10], [11], [12] et [13].

Les indicateurs de défaillances sont principalement :

- un comportement hydraulique douteux (fuites, haut niveau de saturation) ;
- un comportement mécanique évolutif (tassements et/ou déplacements non amortis ou qui s'accroissent) ;
- des signes visuels de pathologie (fissures, glissements même superficiels, pentes raides, résurgences, ...).

Le retour d'expérience accidentologique a montré l'efficacité de la surveillance, lorsqu'elle est réalisée selon les règles de l'art, pour détecter précocement les signes pouvant conduire (en l'absence d'intervention de mise en sécurité de l'ouvrage) à une potentielle rupture par glissement sous sollicitation statique.

La surveillance n'est efficace que si elle est associée à une intervention, qui peut consister en une action d'exploitation de mise en sécurité de l'ouvrage ou une opération de maintenance. La surveillance et la maintenance permettent aussi de maintenir les barrières de l'ouvrage, donc sa sûreté dans le temps, malgré les agressions ou le vieillissement.

La bonne surveillance et maintenance d'un ouvrage dans le temps constitue alors une barrière robuste pour se prémunir d'un risque de glissement sous sollicitation statique. Cette barrière peut être valorisée dans l'Analyse Des Risques d'une EDD, et permettre de réduire la cotation de la branche de l'ERC « rupture barrage » associée à ce mécanisme de rupture.

3.7. Historique d'exploitation, notamment les épreuves subies par l'ouvrage

L'ancienneté d'un ouvrage peut constituer un gage de confiance : les barrages anciens ont subi de nombreuses épreuves de chargement, qui sont autant de tests de robustesse ; leur comportement à l'occasion de ces épreuves est un enseignement précieux quant à leur capacité à résister à de futures sollicitations.

L'analyse du comportement historique est une composante importante de l'analyse de sûreté d'un barrage, elle intègre bien cet historique, mais d'une manière qualitative.

L'approche Bayésienne, présentée notamment dans l'article [15] propose une méthode rigoureuse pour quantifier la prise en compte de cet historique pour un barrage. Il reste encore à établir et consolider les tables de vraisemblance sur des cas d'application, nécessitant un effort collectif.

Une limite importante doit être respectée : la prise en compte des épreuves passées ne peut être considérée que si le barrage n'a pas trop évolué depuis. Ces analyses doivent donc évaluer la sensibilité de l'ouvrage au vieillissement et aux agressions.

4. UN EXEMPLE : EVALUATION DU RISQUE DE GLISSEMENT DU BARRAGE « INCERTAIN MAIS SANS HISTOIRE »

Un exemple d'analyse du risque de cisaillement sous sollicitation statique, en situation normale d'exploitation, est proposé sur le barrage fictif « incertain mais sans histoire ». L'ouvrage est en service depuis de nombreuses décennies et n'est pas réputé être pathologique. Etant classé, il doit faire l'objet en 2025 d'une évaluation de sa sûreté dans le cadre de son EDD.

4.1. L'histoire du patient

Le barrage a été construit dans les années 1950, suivi d'une mise en eau en 1959. Il s'agit d'un barrage en remblai homogène de 20 m de hauteur, construit avec les alluvions du site qui composent également la fondation. Le remblai a été monté par couches successives avec un important compactage grâce aux engins lourds disponibles, comme l'attestent les nombreux contrôles de construction.

Afin de maîtriser les risques associés aux écoulements dans les remblais, le concepteur a opté pour une conception avec une étanchéité amont drainée, qui permet également de surveiller les fuites de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation comprend également des éléments topographiques permettant de suivre les déformations de l'ouvrage. L'ouvrage fait l'objet d'une surveillance basée sur des analyses régulières des données d'auscultation et d'inspection. Des campagnes de maintenance sont réalisées dès que nécessaire, pour maintenir en bon état l'ouvrage et ses barrières.

La mise en eau initiale a été mouvementée, avec des tassements - de consolidation - d'abord importants mais présentant rapidement des infléchissements, et des fuites importantes ayant nécessité plusieurs cycles de remplissage/abaissement et réparations. Ces incidents étaient consécutifs à la situation spécifique qu'est la mise en eau. Passé ces « défauts de jeunesse », le comportement historique n'est marqué que par quelques épisodes d'augmentation des fuites. Celles-ci étaient associées à des dégradations de l'étanchéité, qui après réparation sont revenues à des petits débits. Le comportement actuel est bon : les fuites sont faibles et captées par le drainage, la piézométrie en fondation est basse et stable, les tassements sont amortis.

Les tournées d'inspection, effectuées et analysées régulièrement, n'ont jamais relevé de signe ou d'indicateur de défaillance (fissures des remblais, loupe de glissement, zone humide...) associé aux mécanismes de rupture des barrages en remblai.

4.2. Evaluation des risques dans le cadre de l'EDD – première approche basée sur des résultats de calcul

Le barrage est classé A et à ce titre doit faire l'objet d'une EDD. Le maître d'ouvrage missionne un Bureau d'Etudes agréé pour mener cette étude. Le risque de rupture du barrage est retenu comme un Evénement Redouté Central (ERC), et l'un de ses Evénements Initiateurs (EI) est le risque de glissement sous sollicitation statique.

Les archives de la conception et de la construction, bien que nombreuses, ne comportent pas ou très peu de justification du barrage vis-à-vis de ce risque. Une étude de stabilité doit donc être réalisée pour l'évaluer.

Le BE commence par construire les modèles de l'ouvrage, en se basant sur les données historiques ainsi que sur les récents examens réalisés dans le cadre du Diagnostic Exhaustif de l'ouvrage. Lorsque ces données sont lacunaires ou incertaines, des reconnaissances (géotechniques, topographiques...) sont entreprises. Des hypothèses raisonnablement conservatives (au sens des recommandations CFBR [3]) sont prises pour les paramètres.

La pente du talus aval du barrage est raide (3H/2V). Sans surprise, pour la Situation Durable d'Exploitation à côte de Retenue Normale, le Facteur de Sécurité obtenu (1,3) par calcul à l'équilibre limite est inférieur au Facteur de Sécurité de référence (1,5) proposé dans les recommandations CFBR [3].

Basée uniquement sur ce résultat de calcul, une cotation de l'EI « risque de glissement sous sollicitation statique » en situation durable d'exploitation à RN serait mauvaise et pourrait être traduite par une probabilité d'occurrence élevée et devrait conduire à une non-conformité de l'ouvrage aux règles de l'art actuelles, en l'occurrence les recommandations du CFBR 2015 [3] sans recours aux modulations du Facteurs de Sécurité.

4.3. Evaluation des risques dans le cadre de l'EDD – approche approfondie

Devant l'incohérence de ces résultats de calcul médiocres avec d'une part le bon comportement de l'ouvrage observé depuis plus de 60 ans, et d'autre part le REX accidentologique, le BE cherche à prendre du recul et développer une évaluation des risques basée sur une approche approfondie, comme le permettent les recommandations du CFBR [3].

Dans une note dédiée et étayée, le BE développe les arguments suivants :

- La conception de l'ouvrage correspond à une conception moderne, intégrant notamment plusieurs fonctions importantes de sécurité (étanchéité, drainage, résistance des matériaux utilisés...), bien que la stabilité de la pente du talus aval n'ait pas été fixée avec les mêmes Facteurs de Sécurité que les références utilisées actuellement.
- La construction des remblais a été soignée, avec une maîtrise des matériaux utilisés et de leurs conditions de mise en œuvre (compactage et contrôles).
- L'ouvrage est en service depuis de nombreuses décennies : il a éprouvé son chargement à côte de Retenue Normale à de très nombreuses reprises et sur des longues durées, il a présenté et présente toujours un bon comportement, constaté par un dispositif d'auscultation adapté et des tournées d'inspections régulières.

- L'ouvrage fait l'objet d'une maintenance récurrente, permettant de palier à ses dégradations, en particulier celles causées par le vieillissement (notamment l'étanchéité).
- Les modèles de l'ouvrage et leurs paramètres ont été basés sur des reconnaissances, et dans la mesure du possible ceux-ci ont été recalés sur des mesures d'auscultation, permettant ainsi d'avoir une bonne confiance quant à leur incertitude. En particulier, le modèle géologique de la fondation n'a pas identifié de piège ou de structure géologique réputé à risques.
- L'analyse du REX accidentologique, qui montre la très faible occurrence de ce mécanisme de rupture, en particulier en dehors des situations réputés à risques (et dont le barrage ne fait pas partie).

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, le Bureau d'Etudes estime que le risque de cisaillement sous sollicitation statique à côte de Retenue Normale est très faible, malgré des résultats de calcul à l'équilibre limite un peu en dessous des critères de références actuels. Ce jugement est valable à court ou moyen terme avec un risque très faible, hors situation accidentelle, d'évolution non détectée des conditions de stabilité. Dans le cadre de l'EDD, il propose de traduire ce jugement dans la cotation de l'Evènement Initiateur associé, en associant une probabilité d'occurrence très faible et acceptable. Finalement, cette branche ne ressort plus comme un scénario critique et ne constitue plus une non-conformité.

5. CONCLUSION

Conformément aux recommandations du CFBR [3], la justification des barrages en remblai vis-à-vis du risque de glissement sous sollicitation statique passe le plus souvent par un calcul à l'équilibre limite. La justification est considérée comme acquise lorsque les facteurs de sécurité globaux calculés atteignent ou dépassent des facteurs de sécurité seuils.

Pour les ouvrages existants, le présent article invite à développer une justification approfondie non exclusivement basée sur les résultats de calcul à l'équilibre limite. Les recommandations du CFBR [3] ouvre la porte à cette voie.

Plusieurs arguments pour ce type de démonstration ont été abordés :

- Les mécanismes physiques principaux pouvant conduire un ouvrage stable à rompre par glissement, leur possibilité d'occurrence en situation normale d'exploitation et leur prise en compte dans une étude de sûreté générale, incluant l'ensemble des modes de ruptures et des situations de calcul, réalisée dans le cadre des études de danger et de conformité à l'ATB ;
- la question de moduler le coefficient de modèle ou les coefficients partiels, pour les cas où les modèles de l'ouvrage, basés sur des reconnaissances suffisantes, comportent une incertitude faible ;
- l'analyse du retour d'expérience accidentologique, identifiant les cas les plus sensibles, mais aussi les cas où le risque est pratiquement nul (statistiquement) ;
- l'efficacité d'une bonne conception et construction ;
- l'efficacité de la barrière surveillance associée à l'intervention, y compris une maintenance suffisante ;
- la valorisation de l'historique d'exploitation et les épreuves passées.

Le jugement conclusif analysera l'ensemble de ces éléments et pourra conduire à considérer, dans certaines conditions, qu'un barrage en remblai dispose de marges de sécurité suffisantes vis-à-vis du risque de rupture par grand glissement sous sollicitation statique même si les résultats de calcul à l'équilibre limite n'atteignent pas strictement les seuils.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement
- [2] Arrêté du 6 août 2018 (JO du 29/08/2018) fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages
- [3] Guide CFBR : « Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai », octobre 2015
- [4] ICOLD Bulletin 99 (2020 update) Incident database – Statistical analysis of dam failures
- [5] 2000 Foster, Fell, Spannagle, The statistics of embankment dam failures and accidents, Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.5, National Research Council Canada, Ottawa, 1000-1024
- [6] 2017 Courivaud, Vogel, Charvin, Lessons learnt from embankment dam failures by static slope instability
- [7] ICOLD Bulletin 60 (1988): Dam monitoring, General consideration
- [8] ICOLD Bulletin 68 (1989): Monitoring of dams and their foundations, State of the Art
- [9] ICOLD Bulletin 87 (1992): Improvement of existing dam monitoring
- [10] ICOLD Bulletin 118 (2000): Automated Dam Monitoring Systems, Guidelines and case histories
- [11] ICOLD Bulletin 138 (2009): General Approach to Dam Surveillance
- [12] ICOLD Bulletin 158 (2013): Dam surveillance guide
- [13] ICOLD Bulletin 180 (2022): Dam surveillance – Lessons Learnt from case histories
- [14] 2019 Fry, Justification des barrages en remblai et de leur fondation : état de l'art et perspectives – Colloque CFBR 2019
- [15] 2019 Deroo, Lino, Mevel, Fry, Tenir compte de l'histoire dans les justifications de stabilité : l'approche Bayésienne, Colloque CFBR 2019
- [16] 2019 Bory, Bouchemella, Dubreucq, Fleureau, Fry, Taibi, Caractérisation du critère de rupture pour un remblai non saturé en condition normale d'exploitation – Colloque CFBR 2019
- [17] 2022 Final investigation report – Investigations of failure of Edenville and Sanford dam – Independent forensic team