QUAND UNE APPROCHE EN COTE DE DANGER PERMET D'OPTIMISER LE PROJET DE SECURISATION D'UN BARRAGE BCR

Julien GOLETTO, Éric VUILLERMET

BRL Ingénierie, 1105, av. Pierre Mendès-France BP 94001, 30001 Nîmes cedex 5, FRANCE Julien.Goletto@brl.fr; Eric.Vuillermet@brl.fr

Nicolas JUANOLA

Conseil Départemental de l'Hérault, Hôtel du Département - Mas d'Alco 1977 avenue des Moulins 34087 MONTPELLIER njuanola@herault.fr

MOTS CLEFS

Barrage en Béton Compacté au Rouleau (BCR), dossier de révision spéciale, cote de danger, confortement,

KEY WORDS

Roller-Compacted Concrete (RCC), special review documentation, danger level, strengthening

RÉSUMÉ

Suite à la première étude de dangers associée à la dernière revue de sureté du barrage des Olivettes Barrage BCR de classe A, au vu des premières reconnaissances menées, il avait été identifié un risque de non-respect des critères de stabilité pour l'ouvrage.

Dans un premier temps, une campagne d'investigations complète a permis de mieux caractériser l'ouvrage. Si la stabilité sous sollicitations de projet était assurée, il a été mis en évidence que la stabilité à la crue extrême n'était pas justifiée. Un projet de confortement par tirants actifs avait donc été proposé pour l'ensemble du barrage.

En charge de la rédaction du Dossier de révision spéciale, nous avons opté pour une remise à plat des premières suggestions de réhabilitation, et appréhendé le risque d'instabilité au travers de la détermination de cotes de danger.

S'appuyant sur les résultats de l'étude hydrologique exprimée en cote de projet reliant niveau de sollicitation hydraulique et périodes de retour, nous avons cherché pour des tronçons d'ouvrage homogènes à estimer une cote de danger à laquelle rattacher une probabilité d'occurrence.

En s'intéressant à la stabilité du barrage et de son parapet dans les sections non déversantes et à la stabilité au droit de la section déversante, les calculs itératifs ont permis de déterminer les niveaux de sollicitations limites.

Il est observé que :

- En section non déversante, les critères de stabilité du barrage ne sont pas vérifiés pour une crue de période de retour supérieure ou égale à 73 000 ans ;
- En section déversante, les critères de stabilité du barrage ne sont pas vérifiés pour une crue de période de retour supérieure ou égale à 7 200 ans.

À la vue des résultats, l'approche en cote de danger nous a permis de discrétiser les propositions de sécurisation en fonction des probabilités d'occurrence des évènements extrêmes.

À ce jour, en application de l'arrêté technique Barrage publié ultérieurement, aucun confortement n'est exigé. Les conclusions définitives sont reportées à l'analyse de risques qui sera menée lors de la future étude de dangers.

ABSTRACT

After the first risk assessment in the frame of the last safety review of Les Olivettes RCC Class A dam, the first investigations showed that there was a risk of instability.

Before going any further, a comprehensive series of investigations was carried out to get a better picture of the dam. While it was found that the stability of the dam withstood the design conditions, it nevertheless appeared that it was not justified in the event of an extreme flood. Hence the proposal of a project to strengthen the whole dam by means of actively-tensioned tie rod anchoring.

Considering our duty to draft the Special Review documentation, we opted for reconsideration of the first refurbishment suggestions and decided to examine the risk of instability through the determination of danger levels.

Using the results of the hydrological study expressed as the design elevation associating hydraulic conditions and flood return periods, we sought to justify a danger level for uniform sections, attaching a probability of occurrence each time.

By examining the stability of the dam and its parapet wall in the non-overtopping sections and the stability of the overtopping section, iterative calculations led us to determine the limits of the allowable conditions.

It appeared that:

- In non-overtopping sections, the stability of the dam is only at risk for a flood with a return period equal to or in excess of 73 000 years;
- In the overtopping section, the stability of the dam is only at risk for a flood with a return period equal to or in excess of 7 200 years;

Considering these results, the danger level approach was a way of discretizing proposals to secure the dam according to the probabilities of occurrence of extreme flood events.

To date, by application of the later released technical decree on Dams, no strengthening works are required. The final conclusions will be drawn after the analysis carried out in the frame of the future risk assessment.

1. PRESENTATION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

Construit entre 1986 et 1988 sous la maîtrise d'œuvre de BRL, le barrage des Olivettes est édifié sur la Peyne, un affluent de l'Hérault, sur la commune de Vailhan. Intégré dans le programme général d'aménagement et de développement de la Vallée de l'Hérault, il a pour vocation l'irrigation et l'écrêtement des crues.

L'ouvrage est en service depuis 1990 et en exploitation depuis 1994.

Premier grand barrage métropolitain réalisé en béton compacté au rouleau, le barrage, de 254 m de long et 35 m de hauteur sur fondation présente un évacuateur de crues à surface libre de 40 mètres de long, positionné en partie centrale, d'un pertuis de régulation attenant et d'une tour de prise étagée, rapportée en 2000 sur le parement amont de l'ouvrage.

L'étanchéité du corps de l'ouvrage est assurée par un parement amont vertical coffré, constitué de BCR enrichi en liant et d'un traitement particulier des reprises. Sans joint de dilatation, le barrage a rapidement développé 6 fissures transversales, dont 5 ont fait l'objet de travaux d'étanchéification. En fondation, un voile d'injections réalisé par 4 lignes de forage assure l'étanchéité en fondation et au contact BCR / rocher.

Le réseau de drainage du barrage est constitué de 3 sous-systèmes assurant la dissipation des sous-pressions, l'interception d'éventuels écoulement et leur rejet dans le bassin de dissipation aval, pour le corps de l'ouvrage, sa fondation et ses versants. Ainsi, pour le corps du barrage à proprement parler, 36 forages intérieurs légèrement inclinés vers l'aval ont été réalisés depuis la partie supérieure du barrage. Ils ont pour vocation l'interception d'écoulement internes. 57 forages intérieurs, forés depuis la galerie de visite, servent à dissiper les sous-pressions en fondation, complétés par 45 autres drains extérieurs forés en pied aval.

Pour l'évacuation des crues, l'ouvrage est pourvu d'un seuil Creager de quarante mètres de long et d'un pertuis supplémentaire en rive gauche, légèrement plus profond.

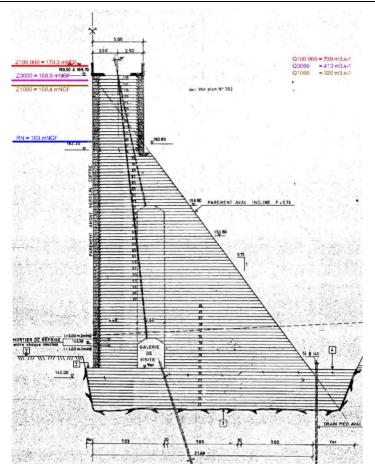


Figure 1 - Coupe type d'un profil type non-déversant

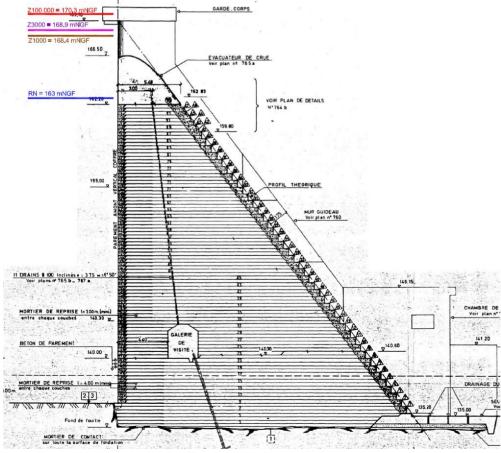


Figure 2 - Coupe type d'un profil type déversant



Figure 3 - Vue aval du barrage des Olivettes

2. CONTEXTE

Ouvrage poids de classe A en Béton Compacté au Rouleau, le barrage des Olivettes a fait l'objet en 2011 d'un Examen Technique Complet et d'une Revue Périodique de Sureté.

Dans le cadre de cette opération décennale, des investigations particulières ayant pour but d'évaluer le vieillissement du matériau constitutif de l'ouvrage ont été menées.

Porté par une campagne de reconnaissances très partielle sur la base d'un seul et unique forage, le rapport d'examen concluait sur la présence d'une passe de matériau fortement dégradée, à proximité de la galerie de visite.

Les mesures de densité avaient alors permis de réestimer la densité moyenne du BCR à 2.3 T/m3 en lieu et place des 2.4 T/m3 considérée pour le dimensionnement initial de l'ouvrage et confirmée par les essais conduits au cours de sa construction.

Reposant sur cette analyse, la Revue Périodique de Sureté s'achevait, entre autres, sur les recommandations de la production d'investigations supplémentaires ainsi que la conduite d'une analyse préliminaire de la stabilité de l'ouvrage, avec notamment pour données d'entrée cette nouvelle valeur de densité moyenne.

Cette première révision des calculs de stabilité, exécutée en 2013, a conduit dans un premier temps à mettre en avant un risque d'instabilité des profils déversants et non-déversants de l'ouvrage sous sollicitations rares (pour des crues de période de retour 1 000 ans et plus) et recommandait un abaissement préventif de la cote de Retenue Normale et le maintien à vide de son bassin de dissipation, et ce, dans l'attente des nouveaux éléments issus des investigations supplémentaires.

Le 23 janvier 2015, sur la base de ces éléments, le préfet de l'Hérault prescrivait, par arrêté préfectoral, la réalisation d'un diagnostic de sureté de l'ouvrage, tout en officialisant l'abaissement provisoire de la cote de Retenue Normale.

Les études suivantes ont été menées en fin d'année 2016 :

- une nouvelle campagne de reconnaissances géotechniques qui a permis de redéfinir les paramètres mécaniques mais aussi de valider des hypothèses de densité à prendre en compte ;
- Une mise à jour de l'étude hydrologique basée sur l'approche Shypre ;
- Avec le nouveau jeu de paramètres fiabilisés, une mise à jour de l'étude de stabilité de l'ouvrage qui montrait alors une stabilité de l'ouvrage sous sollicitations rares (crues de périodes de retour 1 000 et 3 000 ans) et une instabilité potentielle à une crue extrême de période de retour 100 000 ans.

Il est alors envisagé plusieurs solutions de confortement, dont une solution impliquant la réalisation de tirants postcontraints depuis la crête de l'ouvrage, intéressant 165 mètres linéaires de crête, profils déversants ou non. C'est cette solution qui a obtenu les faveurs du Conseil Départemental de l'Hérault.

C'est dans ce cadre qu'a été engagé le montage du dossier de révision spéciale.

3. LA METHODOLOGIE RETENUE

Retenu pour la rédaction du dossier de révision spéciale et l'approfondissement au niveau avant-projet de la solution de confortement retenue, s'appuyant sur le diagnostic complet de l'ouvrage, le nouveau bureau d'étude BRLi a proposé au Propriétaire de l'Ouvrage une approche différente.

Notre implication historique sur l'ouvrage, notre connaissance de son comportement au travers du suivi de l'auscultation depuis sa réalisation, nos visites biannuelles et la réappropriation des éléments issus des inspections particulières et campagnes de sondages, nous ont permis d'engager une évaluation du niveau de sureté de l'ouvrage vis-à-vis de l'instabilité mécanique, optant pour une approche par tronçons homogènes, approche permise par la séparation en plots du barrage, imputable à sa fissuration. De plus, puisque l'ouvrage atteint les objectifs de sécurité pour les combinaisons d'actions quasipermanentes et rares, l'objectif est d'adopter une démarche en cotes de danger, avec pour chaque tronçon du barrage l'association d'une cote de plan d'eau extrême pour laquelle la stabilité de la section n'est plus assurée.

Ce zonage permet de discrétiser les mesures de confortement à redéfinir, de façon à proposer au maître d'ouvrage et aux services de contrôle une approche de réduction des risques pragmatique.

4. APPLICATION AU BARRAGE DES OLIVETTES

Depuis sa construction et première mise en eau, le barrage des Olivettes fait l'objet du suivi prescrit par la réglementation. Son comportement peut être évalué aujourd'hui sur la base des données d'auscultation, du contenu des visites techniques approfondies, des bilans de sureté réguliers et notamment sur la base des investigations menées.

4.1. Analyse globale des observations

L'analyse croisée des observations a montré que :

- Le BCR est un matériau comprenant une certaine hétérogénéité due principalement à sa mise en œuvre et à sa teneur en liant ;
- Les caractéristiques mécaniques du BCR sont restées assez stables dans le temps ;
- Les écoulements internes au BCR, sont favorables à un lessivage du liant mais restent nettement freinés par la formation de calcite dès qu'ils atteignent la galerie de drainage ou l'extérieur. Le barrage est sujet à une lixiviation localisée de son liant.;
- L'analyse physico-chimique d'échantillons de BCR ne révèle aucune pathologie particulière ;
- Les examens des forages de reconnaissances ont permis de visualiser des venues d'eau sur les parois des forages aux alentours de la cote 142.00 mNGF, révélatrices d'une circulation d'eau au sein du parement amont.

4.2. Bilan sur l'état actuel du corps de l'ouvrage

Sur la base des éléments analysés, il est conclu que le corps de l'ouvrage présente un état plutôt satisfaisant. Les investigations géotechniques effectuées ont été menées sur 3 profils de l'ouvrage. Ces profils correspondent à des sections « non déversantes ». Toutefois, ils encadrent la section « déversante », ce qui permet de pouvoir considérer qu'une certaine continuité des caractéristiques puisse exister entre chaque rive, les conditions de mise en œuvre étant identiques.

Les venues d'eau observées à l'intérieur des forages témoignaient de l'existence de passes de densités et porosités hétérogènes, observées sur tous les forages, sans véritable correspondance altimétriques. Les imageries de parois permettaient de visualiser des suintements le long des parois ou quelques jets d'eau sous pression, provenant de la retenue amont, sans véritable correspondance d'un forage à l'autre.

Enfin, l'observation des contacts barrage-fondation, exemple en figure 4, a permis de conserver le jeux de paramètres mécaniques prudent proposé dans les études précédentes.

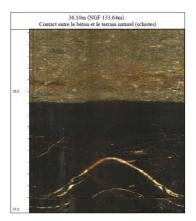


Figure 4 : Contact BCR- Rocher de fondation en imagerie de paroi

Cet ensemble de données collectées et regroupées dans le cadre du Dossier de Révision Spéciale a permis de produire un diagnostic complet de l'ouvrage, nécessaire à la consolidation des hypothèses de calcul pour l'évaluation du niveau de sureté de l'ouvrage.

4.3. Evaluation du niveau de sureté de l'ouvrage

4.3.1. Introduction

Dans un premier temps, une analyse de la stabilité de l'ouvrage sur différents profils représentatifs d'un tronçon homogène a été réalisée, ce pour différentes combinaisons de sollicitation, quasi-permanentes, rares ou extrêmes.

Ensuite, la démarche a consisté à l'évaluation du niveau de sureté actuel de l'ouvrage, en estimant une cote de danger pour deux sections représentatives.

4.3.2. Évaluation de la stabilité actuelle du barrage

4.3.2.1. Géométrie des sections de barrage vérifiées

Sur la base du cahier de profil de récolement et du levé de fond de fouille, ont été retenus pour étude 4 profils résultants d'une discrétisation de l'ouvrage en tronçons homogènes.

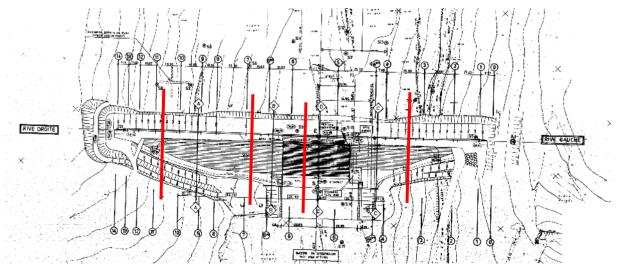


Figure 5 - Localisation des profils de calcul

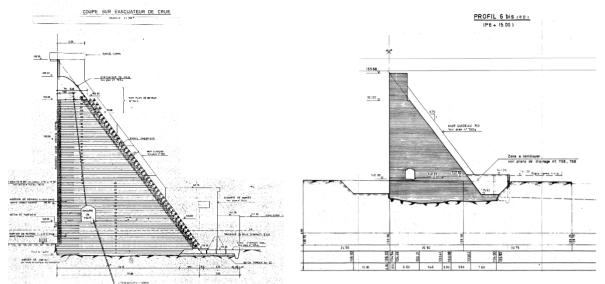


Figure 6 - Coupe type sur déversoir

Figure 7 - Profil 6bis

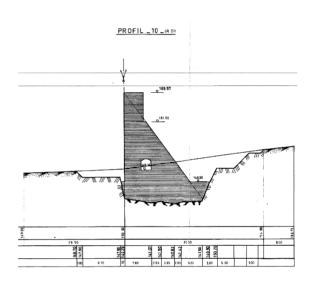


Figure 8 - Profil 10 (RD)

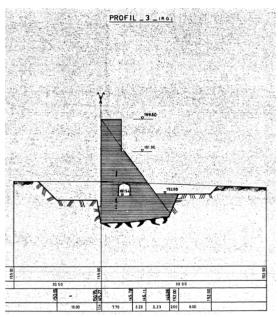


Figure 9 - Profil 3 (RG)

4.3.2.2. Paramètres mécaniques des matériaux

Sur la base de l'ensemble du diagnostic mené, les propriétés mécaniques suivantes ont été retenues pour la conduite des calculs de stabilité :

Tableau 1 - Propriétés du contact BCR/BCR

γ (kN/m³)	24
φ (°)	45
c (kPa)	100
f _{ck} (MPa)	14
f _{tk} (MPa)	0

Tableau 2 - Propriétés du contact barrage-fondation

φ (°)	45
c (kPa)	0
f _{tk} (MPa)	0

4.3.2.3. Hypothèses de sous-pression

En sus des caractéristiques géomécaniques du BCR et du contact barrage-substratum, les hypothèses portent aussi sur le diagramme initial de sous-pressions adopté en regard des données d'auscultation et d'une approche prudente.

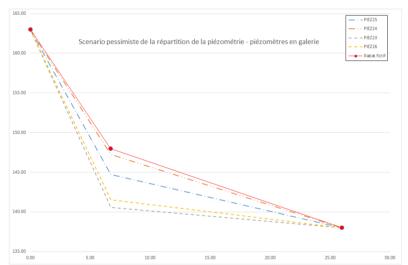


Figure 10 - Scénarios de répartition des sous-pressions sous le barrage pour une retenue normale, confrontés à un rabattement pessimiste de 60%

Pour les sections de barrage étudiées, on représente les profils piézométriques associés par l'exploitation des modèles mathématiques issus des résultats des analyses HST. En résulte l'ensemble des courbes pointillées, correspondant chacune à une section distincte. Le profil piézométrique de calcul (courbe rouge) est un profil enveloppe, correspondant à une valeur de coefficient de rabattement de 60%.

Le diagramme des sous-pressions ci-dessous illustre le profil des sous-pressions aux interfaces barrage-fondation puis BCR/BCR et à différentes cotes de l'ouvrage :

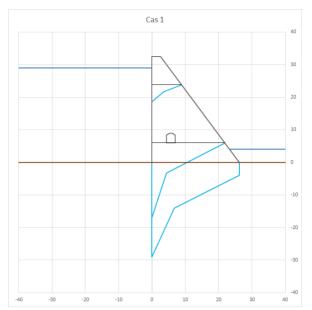


Figure 11 - Profil des sous-pressions aux différentes interfaces de calcul pour la cote RN

Le cas accidentel de la défaillance combinée du voile d'étanchéité et de l'incapacité du voile de drainage à dissiper les sous-pressions est également étudié. La sous-pression initiale sera alors modélisée par une pression trapézoïdale simple, sans rabattement.

4.3.3. Méthodes de calcul

Les calculs conduits restent classiques, ils reposent sur les recommandations éditées par le CFBR.

Reposant sur une approche bidimensionnelle, cette méthode repose sur la détermination des contraintes développées au droit d'interfaces prédéterminées dont les plus remarquables sont l'interface barrage fondation et l'interface BCR/BCR au niveau du plan de la galerie de visite.

On évalue la stabilité des profils définis, selon trois critères imposés:

- L'état limite d'ouverture des fissures ;
- L'état limite de résistance à l'effort tranchant, dont l'expression du critère est rappelé ci-après :

$$\left[C_{k}/\gamma_{mc}.L' + N'.(tan\phi)_{k}/\gamma_{mtan\phi}\right] > \gamma_{d1}.T$$

• L'état limite de résistance à la compression ;

Le calcul d'ouverture des fissures est conduit de façon itérative et inclut la prise en compte de l'évolution du profil de sous-pression au fil des itérations.

Après avoir identifié les différents cas de charge, on étudie les combinaisons d'actions suivantes :

Tableau 3 - Récapitulatif des combinaisons d'actions étudiées

Numéro	Туре	Combinaison d'actions		
1	Quasi- permanente	RN et fosse aval pleine		
2	Quasi- permanente	RN et fosse aval vide		
3	Rare	Crue de période de retour T = 1 000 ans et fosse aval pleine		
4	Rare	Crue de période de retour T = 3 000 ans et fosse aval pleine		
5	Extrême	Crue de période de retour T = 100 000 ans et fosse aval pleine		
6	Extrême	RN, fosse aval pleine et séisme SES		
7	Extrême	RN, défaillance du système de drainage		
8	Extrême	Crue de période de retour T = 1 000 ans et défaillance du pertuis d'évacuation des crues (obturation totale)		

Le tableau 4 ci-dessous consigne les résultats des différents calculs conduits. :

Tableau 4 - Synthèse des résultats

Combinaison d'actions	Profil déversant type	Profil 6bis	Profil 10 - RG	Profil 3 - RD
1	Stable	Stable	Stable	Stable
2	Stable	Stable	Stable	Stable
3	Stable	Stable	Stable	Stable
4	Stable	Stable	Stable	Stable
5	Instable	Instable	Stable	Stable
6	Stable	Stable	Stable	Stable
7	Stable	Stable	Stable	Stable
8	Stable	Stable	Stable	Stable

Les résultats des calculs permettent de constater qu'en l'état, le barrage des Olivettes ne présente pas de risque d'instabilité pour l'ensemble des situations quasi-permanentes et rares. La stabilité de l'ouvrage n'est pas non plus remise en question pour les situations extrêmes de séisme, défaillance combinée des voiles d'étanchéité et de drainage. La seule situation d'instabilité concerne les profils type déversant et 6bis, lors de l'occurrence d'une crue de période de retour T = 100 000 ans. Pour cette situation de calcul, les critères mécaniques ne sont pas respectés au droit de l'interface barrage-fondation.

Au regard de ce résultat, nous allons par la suite chercher à déterminer une cote de dangers pour ces deux profils.

4.3.4. Définition de la cote d'atteinte de la limite de stabilité de l'ouvrage

En reprenant la même méthodologie de calcul et en considérant la combinaison de charge comme accidentelle, on détermine la cote hydraulique au-delà de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est potentiellement plus assurée.

Il est précisé que la cote atteinte au droit du profil non déversant sollicitant le parapet, il a été nécessaire de vérifier la stabilité de ce dernier sous cette sollicitation pour confirmer la cote obtenue.

Nous avons alors pour chacun des deux profils une cote spécifique :

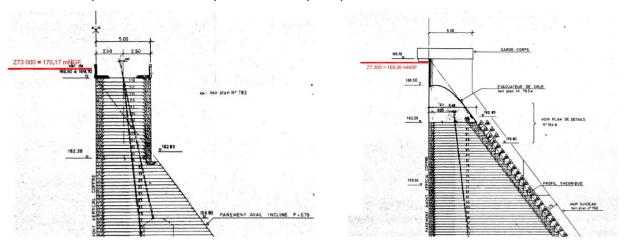


Figure 12 et 13 - Cotes de dangers reportées sur les profils non-déversants et déversants

L'étape suivante consiste à rattacher une période de retour pour chacune de ces cotes obtenues.

En s'appuyant sur les résultats de la dernière révision de l'étude hydrologique et des calculs de laminage associés (figure 13), il est possible d'associer des périodes de retour à ces cotes de dangers, et ainsi relier le risque d'instabilité à une probabilité d'occurrence.

Soit:

- 169.26 mNGF, associée à une période de retour de T = 7 200 ans pour le profil type déversant ;
- 170.17 mNGF, associée à une période de retour de T = 73 000 ans pour le profil type déversant.

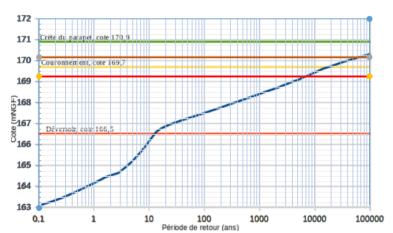


Figure 14 - Distribution de fréquence des cotes du plan d'eau, modifiée pour le DRS

5. CONCLUSIONS

BRL Ingénierie a choisi d'adopter une approche dite « en cotes de danger » lors de la production du Dossier de Révision Spéciale du barrage des Olivettes. Dans un premier temps a été vérifiée la stabilité de l'ouvrage soumis à des crues de périodes de retour prédéterminées. Dans un second temps, a été favorisé la détermination des périodes de retour des crues entraînant la défaillance de l'ouvrage. C'est une méthode de probabilisation de la défaillance, parfaitement compatible avec une démarche de type analyse de risque. Parce qu'elle naît d'un diagnostic global du barrage et une probabilisation des agressions naturelles, elle totalement en phase avec l'exercice des études de dangers.

Plus particulièrement dans le cadre d'études de stabilité et a fortiori l'élaboration d'un dossier de révision spéciale, il parait pertinent d'évaluer le niveau de sureté d'un ouvrage face à une crue extrême. S'appuyant sur les résultats des études hydrologiques et hydrauliques, il est tout à fait envisageable de conduire un raisonnement fondé sur les cotes de danger et de lier une sollicitation du niveau de retenue amont à la période de retour de la crue associée.

Dans le cas du barrage des Olivettes, la démarche permet d'évaluer le niveau de criticité d'un scénario de rupture pour différentes parties de l'ouvrage et d'en analyser le niveau d'acceptabilité.

D'une solution initiale de confortement global de l'ouvrage, les résultats ont conduit le bureau d'études à proposer :

- de juger acceptable le niveau de sureté des profils non déversants,
- de considérer qu'un confortement de la section déversante est à envisager.

À ce jour, l'arrêté technique Barrage a été publié. En regard de son application, aucun confortement n'est exigé par les Services de contrôle. Mais les conclusions définitives sont reportées à l'analyse de risque qui sera menée au plus tard lors de la révision de l'étude de dangers initiale.

En complément, le Bureau d'étude s'est positionné sur une proposition des mesures de réduction des risques, non sans y adjoindre deux préconisations complémentaires:

- l'enrichissement du dispositif d'auscultation;
- l'engagement d'un suivi à long terme de la lixiviation du matériau BCR.