JUSTIFICATION D'UNE COTE DE DANGER SUPERIEURE AU NIVEAU D'ETANCHEITE D'UN OUVRAGE EN REMBLAI

Justification of a the level of danger of rupture that is higher than the waterproofing in an earthdam

Eric VUILLERMET

BRL Ingéniérie eric.vuillermet@brl.fr

MOTS CLEFS

Erosion interne, crue extreme, régime transitoire, sureté

KEY WORDS

Internal erosion, exterm flood, transient seepage analysis, safety

RÉSUMÉ

Le barrage sur l'Agly est un barrage en enrochement dont l'étanchéité est assurée par un complexe pseudo-noyau — paroi moulée arasé à la cote des Plus Hautes Eaux (PHE). Le remblai supérieur à cette cote a été justifié par la détermination de la revanche.

L'étude de danger initiale a retenu comme cote de danger la crête de l'ouvrage en regard de la nature des matériaux mentionnés sur le profil type. Dans le cadre de l'instruction de l'étude par l'administration, il a été demandé de justifier ce choix.

La révision de l'étude hydrologique engagée suite à l'étude de danger a permis de vérifier que la côte atteinte par la crue de projet restait inférieure à la côte de l'étanchéité et d'évaluer la côte atteinte par la crue extrême de période de retour 100 000 ans.

Afin de qualifier le niveau de sûreté de l'ouvrage lors de l'atteinte de cette cote extrême, la démarche a consisté à mener une analyse des mécanismes de rupture liée à l'érosion interne du remblai sommital. La caractérisation du matériau s'est basé sur les données de chantier, les paramètres hydrauliques liés aux écoulements internes sont issus quant à eux, de calculs en régime transitoire, approche retenue du fait de la brièveté des crues de type méditerranéennes. Compte tenu de quelques incertitudes sur la perméabilité, des tests de sensibilité ont été entrepris.

Cette approche a permis de proposer une analyse de risques pour les différents mécanismes dont les résultats viennent étayer la justification d'une cote de danger.

ABSTRACT

The Agly Dam is a rockfill dam waterproofed by means of its pseudo-core cum diaphragm wall system that rises up to the elevation corresponding to the Highest Water Level (HWL). The fill above this level was justified due to the determination of the freeboard.

The initial risk assessment analysis established the danger level as being the elevation of the dam crest considering the type of materials described in the typical cross-section. When the authorities examined the initial assessment, they requested justification of this choice.

The review of the hydrological study following the risk assessment analysis verified that the level reached by the design flood was below the top of the waterproofing system and estimated the level reached by the extreme flood, i.e. the 100 000-year flood.

In order to classify dam safety in extreme flood circumstances, the approach consisted of analysing dam failure mechanisms related to the internal erosion of the fill in the top part of the embankment. The description of the material used was based on works data, while the hydraulic parameters for the internal flows were derived from unsteady state flow calculations, since this was the method chosen due to the short nature of Mediterranean floods. As there were a few uncertainties regarding permeability, sensitivity testing was carried out.

This made it possible to produce a risk analysis for the various mechanisms, the results of which confirm that the danger level is justified.

1. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Le barrage sur l'Agly est situé dans le département des Pyrénées Orientales (66) sur la rivière Agly. Le barrage a les fonctions d'écrêtement des crues et de soutien d'étiage. L'ouvrage a été réalisé d'octobre 1991 à septembre 1994. Sa première mise en eau a débuté en novembre 1994.

Le barrage sur l'Agly de classe A est un barrage zoné en remblai d'enrochements, dont l'étanchéité est assurée par une paroi moulée continue en béton plastique exécutée au sein d'un pseudo-noyau central et ancrée en fondation. La hauteur maximale du barrage est de 57 m au-dessus de ses fondations.

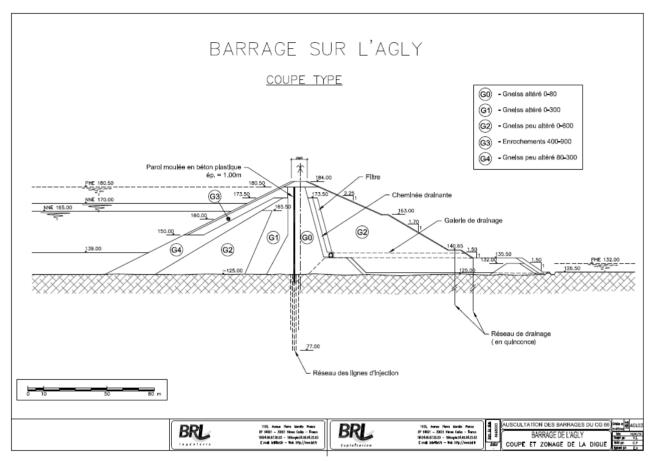


Figure 1 : Profil type – Niveau hydraulique Projet

Les remblais du barrage sont constitués essentiellement de gneiss, en provenance des terrassements et excavations nécessaires à l'exécution de l'évacuateur de crues. Ces remblais sont classés en 3 grandes familles :

- G1 : Un tout-venant de gneiss altéré, de couleur brun ocre, constitué essentiellement de zones de couverture, mais aussi de zones d'altération plus profondes, de fuseau moyen 0-300 mm (Dmax requis : 400 mm) ;
- G3 : des matériaux provenant des veines les moins altérées de couleur gris à gris-bleu, produisant après le tir un toutvenant d'enrochements relativement sains, dont la teneur en fines est à peu près nulle et la taille des plus gros éléments de l'ordre de 600 à 800 mm, du fait du niveau de fracturation ;
- G2 : entre ces deux catégories, on trouve en grande abondance une nature de matériaux à tous points de vue intermédiaire entre celles précédemment décrites : tout-venant de fuseau moyen 0-600 mm (Dmax accepté : 800 mm).

Le zonage du remblai de corps de digue est le suivant :

- Une zone centrale en matériaux peu perméables de type G1 ou dérivant de celui (G0),
- Une recharge amont perméable à drainante de type G2 ou G3,
- Une recharge aval perméable, de type G2.

La zone centrale se subdivise elle-même en une zone pseudo-trapézoïdale constituée de gneiss G1 écrêté à 80 mm (type G0) épaulée à l'amont d'une zone de matériau G1 non criblé.

La perméabilité en place de ce matériau G0 est restée inférieure à 5.10-6 m/s pour une valeur moyenne de 10-7 m/s.

Pour assurer l'étanchéité du corps du barrage, une paroi moulée centrale en béton plastique a été mise en œuvre depuis le remblai calé à la cote d'arase des PHE du projet, soit 180,50 m NGF.

Le couronnement du barrage sur l'Agly est illustré en Fig. 2 et se caractérise par :

- Un niveau d'arase calé à 184,00 m NGF, plus la contre-flèche longitudinale ;
- Une pente transversale vers l'amont de 2%;
- Une largeur théorique en crête de 10 m.

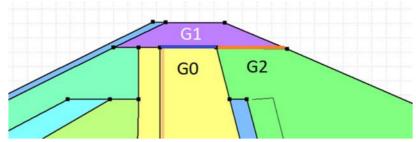


Figure 2 : Détail du couronnement

Compte tenu de la largeur de la partie sommitale de la digue (de 25 à 10 m) entre la cote d'arase de la paroi moulée (180,50 m NGF) et la cote de crête (184,00 m NGF), et des matériaux constitutifs de granulométrie 0/100, il a été considéré à dire d'expert que le remblai situé entre le sommet de la paroi moulée et la crête peut subir sans dégradation préjudiciable une percolation temporaire.

De ce fait, dans un premier temps, il a été considéré que la cote de danger était supérieure à la cote d'arase de la paroi moulée (180,50 m NGF), et est prise égale dans cette étude à la cote de crête (184,00 m NGF).

2. LE CONTEXTE

Suite à la révision des études hydrologiques intégrant l'évaluation des crues extrêmes, et afin de répondre aux demandes émises lors de l'instruction de l'étude de dangers, nous avons engagé une démarche de justification de la non défaillance de l'ouvrage en cas de sollicitations de crues extrêmes.

2.1. Données d'entrée hydrologique et hydraulique

La révision des études hydrologiques nous a permis de réévaluer les niveaux de sollicitations hydrauliques pour différents événements hydrologiques et pour plusieurs modes de gestion de l'ouvrage.

Les principaux résultats sont donnés au travers de la figure suivante sachant que pour un événement nous pouvons définir un limnigramme de la retenue lors du passage de la crue considérée.

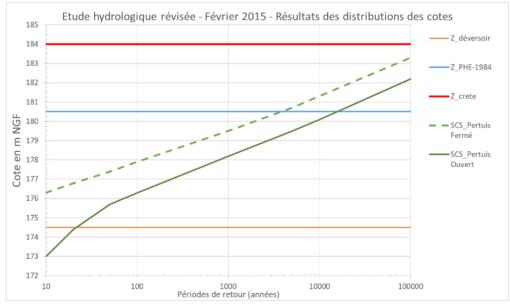


Figure 3 : Hydrologie – Distribution des cotes en fonction des périodes de retour des événements et du mode de gestion

2.2. Données d'entrée sur les matériaux

Concernant la caractérisation des matériaux constitutifs du remblai, en regard des valeurs minimales attendues précisées dans le dossier de conception , des valeurs issues des mesures de contrôle en phase de chantier, contrôle qui portaient essentiellement sur la granulométrie sur le site de production mais aussi sur la perméabilité du matériau en place, il a pu être proposer des paramètres jugés prudents pour les matériaux principaux.

Matériau	Perméabilité (m/s)
G0 : Gneiss altéré 0-80	10 ⁻⁷
G1 : Gneiss altéré 0-400	10 ⁻⁵
G2 : Gneiss altéré 0-800	10 ⁻⁴
G3 : Gneiss altéré 400-900	10 ⁻³
G4 : Gneiss altéré 80-300	10 ⁻⁶
Matériaux drainants	10 ⁻³
Paroi moulée	10 ⁻⁹

Tableau 1 : PHypothèses retenues pour les perméabilités des matériaux constitutifs du barrage

Pour le remblai sommital R1 situé au-dessus de la cote d'arase de la paroi moulée, de par sa fonction secondaire « remblai de fermeture », ses critères de définition étaient limités à un Dmax. Ce n'est qu'au travers de l'analyse des fiches de chantier de suivi du mouvement de terres journalier émises par l'Entreprise mais aussi par le Maitre d'œuvre, que l'on a pu identifier la nature des matériaux mis effectivement en œuvre : Il s'agissait de matériaux issus du stock de G1.

Matériau	Perméabilité (m/s)
R1 : Couronnement = G1	10 ⁻⁵

Pour ces matériaux, nous avons aussi à notre disposition les données granulométriques et/ou blocométriques du conforme de la production. Il s'agit d'essais sur stock de contrôle de production, d'essais issus des planches d'essai de compactage, et d'essais de contrôle sur remblai.

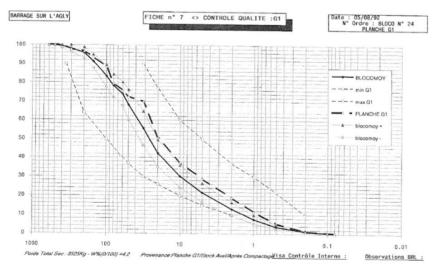


Figure 4 : exemple de contrôle granulométrique sur matériau G1

3. APPROCHE METHODOLOGIQUE ET JUSTIFICATION

3.1.La démarche

L'objectif de l'étude a été d'étudier la sensibilité des matériaux du couronnement du barrage sur l'Agly à l'érosion interne susceptible d'apparaître lorsque le niveau de la retenue est supérieur à la cote du dispositif d'étanchéité (paroi moulée) et ainsi valider l'absence de risque en cas de crue dite extrême.

La situation extrême de crue a été prise pour un évènement de probabilité 10^{-5} soit une crue de période de retour 100 000 ans. Pour cet événement, il a été évalué dans l'étude hydrologique révisée, les cotes maximales atteintes soit : 182,20 m NGF – ou 183,30 m NGF en cas de fermeture de la vanne du pertuis. Compte tenu du régime de crue méditerranéen caractérisé par la brièveté des événements, il a été aussi retenu de considérer une approche en régime transitoire à partir d'une cote de remplissage de la retenue calée à la RN.

L'événement redouté identifié entrainant une défaillance de l'ouvrage au travers de la dégradation du remblai sommital est la rupture par érosion interne de ce remblai.

Pour la sollicitation extrême de crue, il a donc été analysé les différents mécanismes d'initiation de l'érosion interne pour le matériau de remblai sommital.

3.2.Les vérifications

3.2.1. Travail préliminaire

Les travaux préliminaires ont été de deux natures :

- Caractérisation des matériaux sur la base des données existantes
- Simulation du comportement hydraulique interne sous la sollicitation de crue

3.2.1.1. Les modèles géométrique et hydraulique

Les calculs d'hydraulique interne ont été menés à l'aide du logiciel SEEP de Geostudio.

Pour le modèle de calcul, le profil type du barrage appliqué au profil de plus grande hauteur a été retenu (Fig. 5).

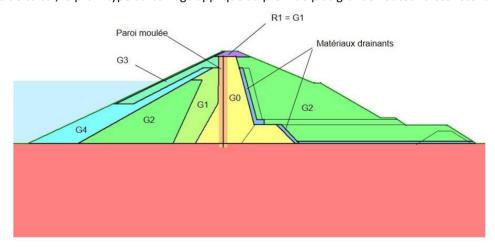


Figure 5 : Modèle Hydraulique - Barrage sur l'Agly (Geostudio)

Les valeurs de perméabilité horizontales et verticales sont prises égales (coefficient d'anisotropie = 1), en retenant des valeurs caractéristiques prudentes correspondant aux exigences minimales du contrat de travaux, les essais de contrôle témoignant du respect de ces paramètres.

3.2.1.2. Conditions aux limites

La situation extrême de crue est simulée à partir d'un modèle hydraulique en régime transitoire.

Il a été extrait de l'étude hydrologique des crues un limnigramme correspondant à une situation extrême (Fig. 8).

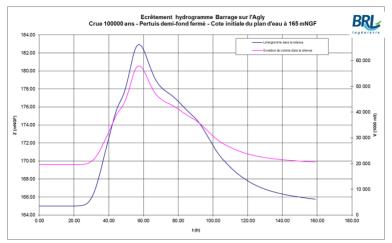


Figure 6: Limnigramme de la crue extrême

Le potentiel hydraulique amont (Fig. 7) est donc introduit sous forme d'une fonction (régime transitoire) ou d'un potentiel fixe (régime permanent), tandis que le niveau aval sera considéré constant calé au potentiel aval dicté par le niveau de la rivière.

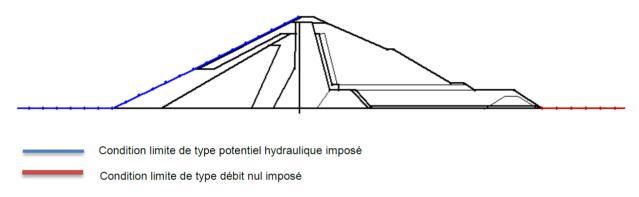


Figure 7: Conditions aux limites du modèle hydraulique

3.2.2. Vérification pour l'érosion de contact

En regard de la géométrie au droit du couronnement et de la nature des matériaux mis en œuvre, la vérification a été menée aux interfaces entre matériaux différents et granulométries différentes, soit :

- Matériau du couronnement (G1) Matériau du noyau (G0)
- Matériau du couronnement (G1) Matériau de la recharge aval (G2)

(Fig. 8).

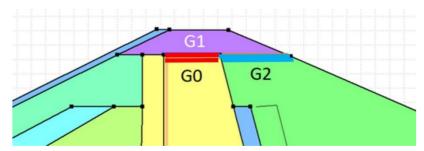


Figure 8: Interfaces susceptibles d'être impactées par une érosion de contact

En regard de l'analyse des courbes granulométriques issus de contrôle d'exécution ou de production, le critère de rétention retenu $\frac{D15}{d85} \ll 4~ou~5$ est vérifié [1], il n'y a donc pas de risque d'initiation d'érosion de contact entre le remblai de couronnement et le pseudo noyau, ni entre le remblai de couronnement et la recharge aval.

Il est conclu donc que l'initiation d'érosion de contact entre les matériaux du couronnement et les matériaux en sousface, dans le cas où un écoulement pourrait s'établir à travers le couronnement est très improbable.

3.2.3. Vérification pour l'érosion par suffusion

Pour le matériau constitutif du couronnement, les deux critères de Kenney et Lau ainsi que Kezdi, réunis par Li et Fannin [2] ont été analysés. Comme proposé par Li et Fannin, il est retenu que la sensibilité à la suffusion est avérée quand le matériau est réputé instable au phénomène par les deux méthodes. La vérification du caractère suffusif a donc été menée uniquement sur le critère généralisé de Li & Fannin.

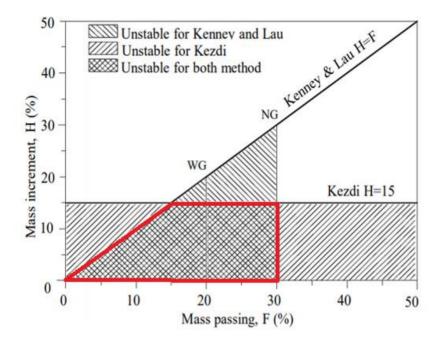


Figure 9 : Synthèses des critères de Kezdi et Kenney & Lau par Li & Fannin [2]

Sont définis :

- F: le pourcentage massique des grains de taille inférieur à D (diamètre du tamis)
- et H: le pourcentage massique des grains de taille comprise entre D et 4D.

On retient une granulométrie « moyenne » sur le matériau (fig. 9 a) et les valeurs de H et F sont ainsi calculée pour tout point. Les valeurs obtenus sont alors tracées et comparées à la zone d'instabilité à la suffusion définie par Li & Fannin. (fig. 9 b)

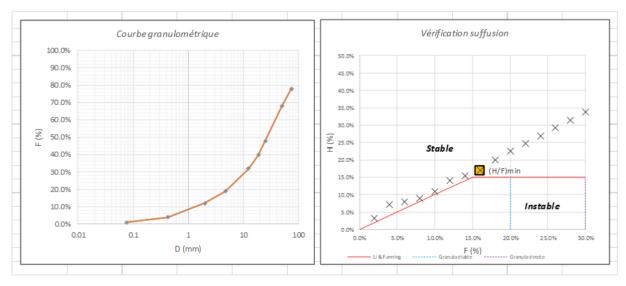


Figure 10 : Application du critère de Li et Fannin

On retient donc que l'initiation de l'érosion de suffusion dans les matériaux constitutifs du couronnement, dans le cas où un écoulement pourrait s'établir dans le couronnement, est peu probable, selon le critère de Li & Fannin (Fig. 10).

3.2.4. Mécanisme d'érosion régressive

Afin de statuer sur le potentiel d'érosion régressive dans les remblais du couronnement, une simulation numérique a été réalisée à l'aide du module SEEP de Geostudio. Les calculs ont été menés en régime transitoire afin de prendre en compte l'effet temporaire de la mise en charge du couronnement.

Pour qu'il y ait initiation de l'érosion régressive, il faut que les deux conditions suivantes soient réunies :

- Les matériaux sont pulvérulents.
- Les écoulements diffus débouchent en talus aval, ou débouchent dans un milieu présentant des vides suffisants pour accueillir les particules érodées.

Le matériau constitutif du remblai de couronnement est considéré comme pulvérulent de par sa nature et sa pauvreté en matériau fin.

Les calculs hydrauliques permettent de vérifier la seconde condition.

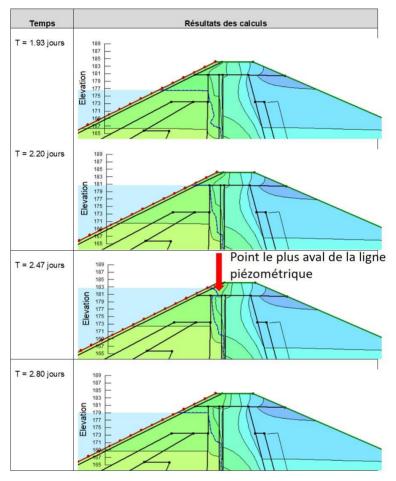


Figure 11 : Evolution de la ligne piézométrique en fonction du temps

Les résultats (Fig. 11) montrent que, lors de la sollicitation par une crue extrême, les écoulements ne trouvent pas exutoires dans des milieux pulvérulents et ne débouchent pas en talus aval de l'ouvrage.

Dans cette démarche, il a été opté de mener des tests de sensibilité.

<u>Sensibilité sur la perméabilité du matériau</u> : Il est retenu une perméabilité 10 fois plus élevée. Les écoulements ne trouvent pas non plus d'exutoires dans des milieux pulvérulents (Fig. 12).

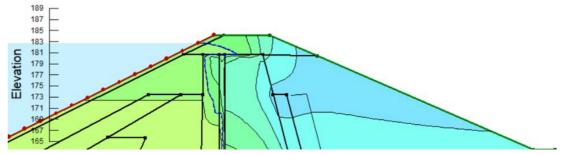


Figure 12 : Test de sensibilité : ligne piézométrique pour une perméabilité supérieure

Sensibilité aux sollicitations :

Pour compléter cette analyse, il a été simulé le cas d'un régime permanent (cas A) mais aussi le cas d'un limnigramme de forme plus étalée (cas B).

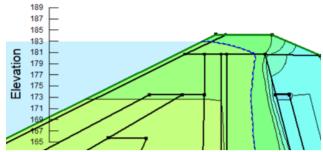


Figure 13 : Test de sensibilité Cas A : calcul en régime permanent

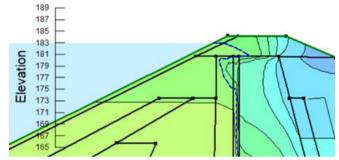


Figure 14 : Test de sensibilité – Cas B : hydrogramme de crue modifié

Il a été conclu que l'initiation de l'érosion régressive dans la configuration actuelle est très improbable, l'absence de débouché des matériaux saturés ne permettant pas l'initiation de ce phénomène.

3.2.5. Erosion de conduit

Compte tenu de la nature pulvérulente du matériau G1, ce mécanisme a été écarté.

4. CONCLUSIONS

Cette démarche s'inscrit dans une approche de justification des cotes de dangers pour les barrages en remblai, démarche cherchant à aller au-delà du « à dire d'expert ».

La recherche des paramètres notamment des matériaux de fonction « marginale » pour le concepteur s'est appuyée sur les documents de chantiers pour réduire les incertitudes liés à la nature des matériaux.

Les tests de sensibilité nous apparaissent nécessaires compte tenu des incertitudes sur les paramètres mais aussi sur les modélisations en régime transitoire.

5. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Terzaghi Principles of soil Mechanics Settlement and consolidation of clay Engineering news-record, vol 95 N°22, 1925
- [2] Li & Fannin Comparison of two criteria for internal stability of granular soil Canadian Geotechnical Journal vol. 45, 2008