

Modernisation du barrage de Rustaing

Modernization of Rustaing Dam

Laurent BALLUT, - CACG

Chemin de Lalette CS 50449 – 65 004 Tarbes cedex - l.ballut@cacg.fr

Franck DEL REY - HYDROPLUS

5 cours Ferdinand de Lesseps – 92 851 Rueil Malmaison Cedex - franck.delrey@hydroplus.com

MOTS CLÉS

Sécurité, crues, Fusegate®, Evacuateur de crue

RÉSUMÉ

Cet article traite de l'adaptation du barrage à de nouvelles contraintes d'exploitation. Il présente une étude exhaustive des scénarios de réhabilitation. L'aspect simplicité et rapidité d'exécution ont guidé le choix de la solution Hausse Fusible.

ABSTRACT

This article deals with the retrofitting of the dam to meet new reservoir operation requirements. Along with a comparative study of alternative rehabilitation scenarios, the article demonstrates how flexibility and short delivery time constraints ultimately lead to the Fusegate® solution.

1. INTRODUCTION

Le barrage du Rustaing implanté sur le Bouès est situé sur les communes de Sère-Rustaing, Lamarque-Rustaing, Villembits et Bugard dans le département des Hautes-Pyrénées (65) à environ 20 kms au Nord-Est de Tarbes. Cet ouvrage d'une capacité de 2 Mm³ a été créé en 1992 pour renforcer la ressource en eau sur le Système Neste et donc pour desservir les besoins de soutien d'étiage et de prélèvements sur le bassin du Bouès. Ce barrage concédé par l'État à la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG) a été conçu et exploité depuis l'origine par cette dernière.

Aujourd'hui, cet axe réalimenté étant saturé vis-à-vis des prélèvements en eau, et fragile quant au respect des objectifs de débit en aval, une modernisation de ses infrastructures hydrauliques s'avère nécessaire, tant pour l'équilibre écologique du cours d'eau que pour une meilleure gestion de la ressource en eau.

Pour pallier ce déficit, la CACG a envisagé différentes réponses visant à créer une capacité de stockage supplémentaire. La première consistait en la création d'une nouvelle retenue d'une capacité de 420 000 m³ associée à une rehausse minimale de la retenue de Sère-Rustaing, permettant ainsi d'obtenir 520 000 m³ supplémentaires. La seconde, portait sur une rehausse plus importante de la retenue existante, afin d'atteindre une augmentation de sa capacité de stockage comprise entre 500 000 m³ et 600 000 m³.

Du point de vue de la gestion des ressources en eau, cette dernière solution bien que techniquement plus complexe à mettre en œuvre, présente de nombreux avantages. D'une part, elle repose sur un ouvrage unique, positionné en tête de bassin, plus simple à gérer que deux ouvrages distincts, garantissant ainsi une

efficience optimale. D'autre part, celle-ci permet d'obtenir des économies d'échelle non négligeables sur les frais d'entretien et d'exploitation du réservoir.

En 2007, la CACG a décidé d'approfondir cette solution afin d'en valider la faisabilité technique et financière, l'une des contraintes majeures étant de réduire les emprises foncières supplémentaires nécessaire pour mener à bien le projet en limitant le niveau des Plus Hautes Eaux Exceptionnelles (PHEE).

2. BARRAGE DU RUSTAING DANS SA CONFIGURATION ACTUELLE

2.1 Principales caractéristiques

Le barrage du Rustaing est un ouvrage en terre homogène compacté d'une hauteur maximale de 16 m et d'une longueur de 475 m, qui barre le ruisseau du Bouès et contrôle un bassin versant de 14,25 km². Suivant le classement des barrages définis par l'arrêté du 11 décembre 2007, il s'agit d'un barrage de classe B dont les principales caractéristiques sont rappelées ci-après :

➤ Cote du Plan d'Eau Normal (PEN) :	350,05 m NGF
➤ Cote du Plan d'Eau Exceptionnel (PEE) :	351,31 m NGF (conditions de projet initial)
➤ Cote de la crête :	351,90 m NGF
➤ Cote du déversoir :	350,05 m NGF
➤ Revanche ultime :	0,59 m (idem)
➤ Capacité utile :	2 000 000 m ³
➤ Volume du culot :	20 000 m ³

L'évacuateur de crues actuel, positionné au centre du barrage, se compose d'un seuil circulaire, d'un coursier et d'un bassin de dissipation à l'aval. Ses caractéristiques sont :

➤ Cote du déversoir (PEN) :	350,05 m NGF
➤ Longueur de seuil déversant :	12 m
➤ Fréquence de la crue de projet :	millénaire,
➤ Débit de pointe de la crue de projet :	55 m ³ /s
➤ Débit de projet (laminé) :	29 m ³ /s



Graphique 1 : Ouvrage évacuateur de crues (vue vers l'amont)



Graphique 2 : Bassin à dissipation et gué de franchissement (vue vers l'aval)

2.2 Niveau de sécurité actuel de l'ouvrage

Lors de sa conception de 1989 à 1990, le barrage du Rustaing rentrait dans la catégorie des petits barrages et, selon les recommandations en vigueur à l'époque, devait être protégé pour la crue millénaire (Q1000 = 55 m³/s).

Rappelons que la notion de crue de sûreté n'existait pas en France à cette époque.

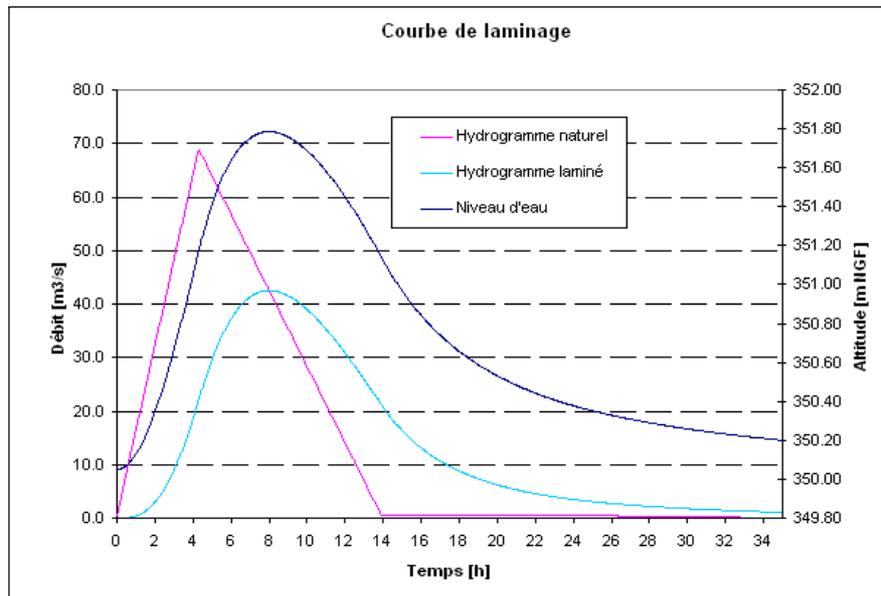
En 1997, le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) a fait évoluer cette réglementation en publiant le manuel "Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi" qui

préconisait de prendre en compte une crue de sûreté intégrant le risque intrinsèque du barrage lié à sa hauteur et à son volume.

La cote de danger est dorénavant systématiquement calculée, ainsi que la fréquence de la crue qui la génère. Dans le cas de la rehausse du barrage de Rustaing elle a été réalisée au travers de l'étude de dangers. Actualisation de la crue de projet

En 2006, lorsque les études de projet ont été réalisées, la fréquence de la crue de projet a été portée à 1/5000 ans en regard des caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

Pour la crue Q5000, le calcul de laminage de la retenue met en évidence que le débit à évacuer par l'évacuateur est dorénavant de 42,5 m³/s, ce qui est nettement supérieur aux 29 m³/s de la crue de projet initiale.



Graphique 3 : Hydrogrammes et surélévation du plan d'eau correspondant à une crue de projet actualisée

L'étude de laminage de crues a montré que le déversoir actuel permettait de passer cette crue réévaluée sous une charge d'eau de 1,65 m. Dans ces conditions, il resterait une revanche de 10 cm entre les PHEE et la crête du barrage, valeur largement insuffisante, mais n'entraînant toutefois pas la submersion de l'ouvrage.

2.2.1 Détermination de la revanche

La revanche représente la différence entre le niveau du plan d'eau et la crête du barrage. Sa détermination dépend des vents ainsi que de la géométrie du plan d'eau. Dans sa configuration actuelle, le barrage possède une revanche ultime de 0,59 m et normale de 1,85 m.

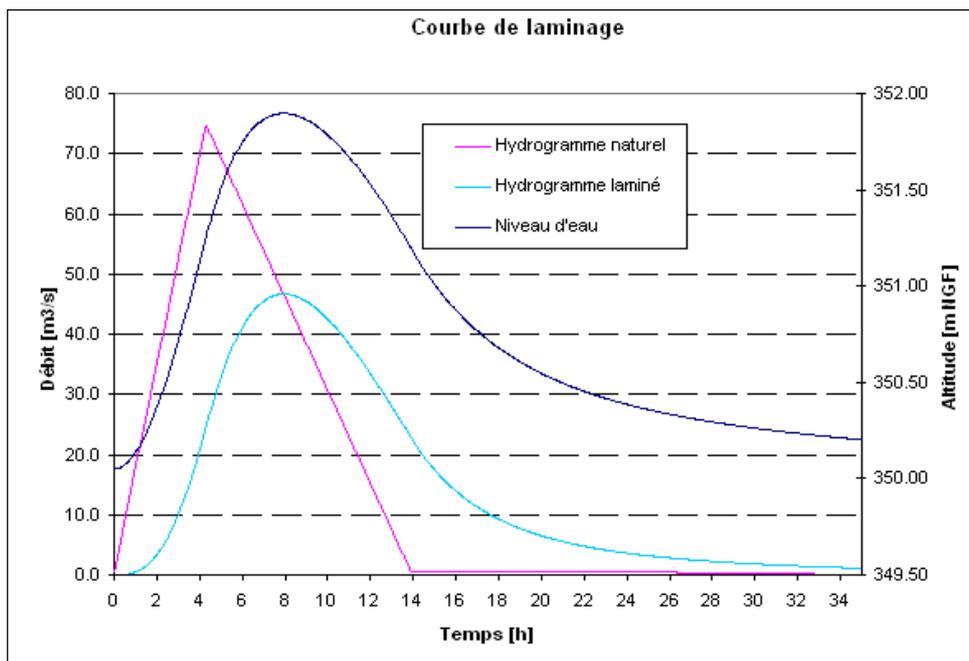
Différentes recommandations et formules permettent de déterminer cette revanche minimale. Pour les ouvrages neufs et de la taille du barrage du Rustaing, celle du CEMAGREF donne une hauteur de 1,15 m. Elle prend notamment en compte les tassements se produisant lors de la consolidation du remblai.

Cette valeur est supérieure à la revanche ultime de 0,59 m existante sur l'ouvrage actuel. Cependant, les mesures topographiques faites depuis plus de 10 ans sur sa crête montrent que la phase de consolidation est terminée. Il paraît donc judicieux de retenir une valeur intermédiaire de 0,95 m, comprise entre 0,59 m et 1,15 m. La détermination de la fréquence de la crue de sûreté devra in fine confirmer cette valeur.

2.2.2 Crue de sûreté - Cote de danger

Dans le cas du barrage du Rustaing, la crue débordante est supérieure à la crue de projet et correspond approximativement à une crue décennale matérialisée par débit de pointe $Q_{10\ 000} = 74,8$ m³/s pour un volume de 1,9 Mm³ écoulé en 14 heures.

L'étude de laminage de crue d'une telle crue confirme que la cote d'eau atteinte lors d'un tel épisode serait de 351.90 mNGF, sachant que le débit évacué à l'aval atteindrait à cette occasion 47 m³/s.



Graphique 4 Hydrogrammes et surélévation du plan d'eau correspondant à une crue débordante

Par contre, une modélisation hydraulique numérique de l'évacuateur de crues actuel a mis en évidence le fait que la lame d'eau dans la partie supérieure du coursier atteint une hauteur supérieure à celle des bajoyers pour un débit excédant 33 m³/s, entraînant dans ce cas des débordements latéraux significatifs.

Il apparaît par ailleurs que dans ces conditions, le bassin de dissipation ne remplit que très partiellement son rôle. En effet, celui-ci impose, par sa géométrie, un débit maximal évacué de 15 m³/s. Au-delà, l'ouvrage ne pourra dissiper correctement l'énergie et l'écoulement saturera très rapidement les deux buses à l'aval, conduisant ainsi à des débordements latéraux importants.

Par conséquent, la cote de danger est bien inférieure à la cote de crête actuelle, ce qui signifie qu'en l'état, le débit de pointe de la crue de sûreté n'excède pas 52 m³/s, ce qui correspond à un temps de retour inférieur à 1000 ans.

2.3 Synthèse des études de diagnostic hydraulique et orientations

La révision de la crue de projet et le calcul de la revanche selon des méthodes modernes donnent des valeurs à considérer nettement supérieures à celles retenues dans le projet initial.

L'évacuateur actuel pourrait évacuer la crue Q5000 en conservant un niveau des PHEE inférieur à la crête du barrage. Cependant, le critère minimal sur la revanche ne serait plus respecté : l'écoulement sortirait du coursier, endommageant ainsi le parement aval et des dégâts se produiraient dans l'ouvrage de dissipation.

3. SOLUTIONS TECHNIQUES PERMETTANT DE REpondre AU DOUBLE OBJECTIF DE "SECURISATION ET D'AUGMENTATION DE LA CAPACITE DE STOCKAGE"

La CACG souhaite augmenter de 25% - soit de l'ordre de 500 000 m³ - la capacité de stockage de la retenue. Cela correspond à une élévation de 1,15 m du PEN et donc à une surélévation du barrage. Une rehausse de cette importance ne saurait être envisagée sans la prise en compte des nouvelles règles de sécurité qui ont été vérifiées au travers de l'étude de dangers.

La cote de crête du barrage et l'emprise foncière prochainement inondées par le projet dépendent du niveau des PHEE. Cette valeur résulte elle-même directement du laminage se produisant dans la retenue et en particulier du type et des caractéristiques de l'évacuateur de crues.

Sachant que les contraintes techniques et foncières n'autorisent qu'un exhaussement relativement limité de la cote de crête de la digue actuelle, il s'agit là du seul paramètre sur lequel il est possible d'intervenir. C'est pourquoi, cet ouvrage a fait l'objet d'un examen approfondi qui a consisté à analyser les différents principes de conception envisageables.

3.1 Principe de rehausse de crête de la digue

Afin de garantir une revanche ultime suffisante, il s'agit en premier lieu de proposer une rehausse de la crête de digue vis à vis du plan d'eau normal de projet (Cote 351.20 mNGF). Cette rehausse pourrait être réalisée soit sous la forme d'un dispositif pare-vagues positionné en crête de digue, soit par le biais d'une recharge mise en place sur le talus amont de la digue.

Toutefois, la rehausse générale de la digue est la seule solution répondant complètement aux critères de sécurité en vigueur. Le choix de remblayer le talus amont ou aval est guidé plus par des critères économiques que par des critères techniques. Le profil de digue du barrage du Bouès est constitué d'une risberme de 8 m de large au milieu du talus amont. Une recharge réalisée sur le talus aval entraînerait des modifications lourdes sur :

l'évacuateur de crues central (rehausse du coursier ou démolition du coursier, déplacement du bassin de dissipation et modification du tracé de la piste aval)

les ouvrages de vidange rapide et de restitution (déplacement de la chambre des vannes, prolongement de la conduite de vidange et reconstitution du bassin de restitution)

Le dispositif de drainage et d'auscultation (extension du tapis drainant, déplacement des piézomètres,...)

En regard de ces éléments, seule une solution de recharge amont sera envisagée.

Une rehausse de la crête de digue comprise entre 70 cm à 1,25 m, nécessiterait la mise en place sur le talus amont d'une épaisseur de remblai supplémentaire de 1,80 à 3,50 m.

Compte tenu de la configuration actuelle et au regard des résultats des études de stabilité, la rehausse de la crête de digue sera plafonnée à 1,25 m.

3.2. Types d'évacuateurs de crues envisageables

3.2.1 Evacuateur vanné

Des vannes équipent ce type d'évacuateur et restent en position fermée pour maintenir le PEN. En cas de crue, un asservissement au niveau du plan d'eau ou une intervention humaine les ouvrent ou les affalent pour laisser passer le débit requis, et respecter ainsi la courbe de plan d'eau objectif.

Cette solution permet d'obtenir un niveau des PHEE proche du PEN. Cependant, une défaillance mécanique ou humaine peut entraîner la non ouverture des vannes et une submersion du barrage.

De plus, l'ouverture des vannes nécessite de l'énergie pour fonctionner et entraîne de surcroît à des coûts de maintenance et d'exploitation élevés.

3.2.2 Evacuateur à déversoir libre

Le seuil de ce déversoir est à la cote du PEN. Lorsque le niveau d'eau dépasse cette cote, la crue s'évacue naturellement par cet évacuateur.

Cette solution n'engendre aucun coût de maintenance ou d'exploitation, et l'intervention humaine n'est pas requise. Cependant, elle correspond à un niveau de PHEE important et impose simultanément la réalisation d'un génie civil imposant et coûteux.

3.2.3 Evacuateur équipé de Hausses Fusibles

Une solution innovante permettant d'avoir les avantages du seuil libre, tout en minimisant le génie civil à réaliser et le niveau des PHEE, a été élaborée par Hydroplus® : le Système Fusegate® ou encore appelé Hausses Fusibles.

Les Hausses Fusibles reposent uniquement sur la force de l'eau pour basculer et ne nécessitent aucune autre source d'énergie. Elles se déclenchent à un niveau d'eau déterminé sans intervention humaine.

Elles permettent donc de combiner les avantages des évacuateurs équipés de vannes et ceux étant à seuil libre. Pour cela, des modules jointifs et indépendants sont juxtaposés sur le seuil libre du déversoir de manière à former un écran étanche.

Les modules sont munis d'une butée à l'aval et lestés afin de rester stables sous la poussée de l'eau. Des purges drainent leurs interfaces avec le seuil évitant ainsi une mise en pression accidentelle.

Cette interface est alimentée par un puits, lorsque le niveau de l'eau dépasse les lèvres du puits, elle met en pression l'interface, apportant ainsi une discontinuité dans l'évolution du rapport des forces.

Cela conduit au déséquilibre du module et à son basculement vers l'aval, où il est emporté par le courant.

Les schémas ci-dessous résument ce principe de fonctionnement :



3.3 Synthèse des combinaisons retenues

Chacun des évacuateurs présentés ci-dessus présente des avantages et des inconvénients. Pour des raisons de sécurité, la solution reposant sur la création d'un unique "évacuateur de crues" entièrement vanné n'a pas été retenue.

De la même manière, la conception reposant sur l'aménagement – d'un unique évacuateur à seuil libre – a également été écartée en raison de son coût d'investissement prohibitif (seuil déversant de dimensions supérieures à 65 mètres).

Seul le système Hydroplus® et l'utilisation de Fusegate® permet de répondre à tous les critères établis par la CACG car il présente le même niveau de sécurité qu'un seuil libre et réduit notablement les dimensions de l'évacuateur et le niveau des PHEE.

Ainsi, des études comparatives se sont portées sur les trois configurations suivantes :

Solution 1 : augmentation de la capacité de l'évacuateur existant à 33 m³/s en remplaçant le seuil fixe par un clapet mécanique et en créant un évacuateur secondaire équipé de Hausses Fusibles.

Solution 2 : augmentation de la capacité de l'évacuateur existant à 33 m³/s et création d'un évacuateur équipé de Hausses Fusibles.

Solution 3 : modification de l'évacuateur existant en l'équipant de Hausses Fusibles, et d'un seuil libre.

4. SCENARI D'AMENAGEMENT CONSIDERES

4.1 Scénario 1 - Rehausse mobile du déversoir existant complétée par un évacuateur de crues secondaire muni de rehausses fusibles

Ce premier scénario s'appuie sur une rehausse minimale de la digue combinée avec 2 évacuateurs équipés de systèmes mobiles, à savoir:

Une rehausse de la crête de digue de l'ordre de 0.65 m, permettant de relever le PEN de 1.15 m et de stocker 500 000 m³ supplémentaires tout en garantissant une revanche ultime de 0.95 m,

La réhabilitation de l'évacuateur de crues actuel réalisant une réfection intégrale de l'entonnement et du dalot, le seuil fixe devant être remplacé par un seuil mobile (seuil à clapet). La position du clapet serait asservie à la cote du plan d'eau amont,

La création d'un évacuateur secondaire, équipé de Hausses Fusibles, positionné entre l'ouvrage actuel et la rive droite, capable d'évacuer les débits correspondant à des événements exceptionnels.

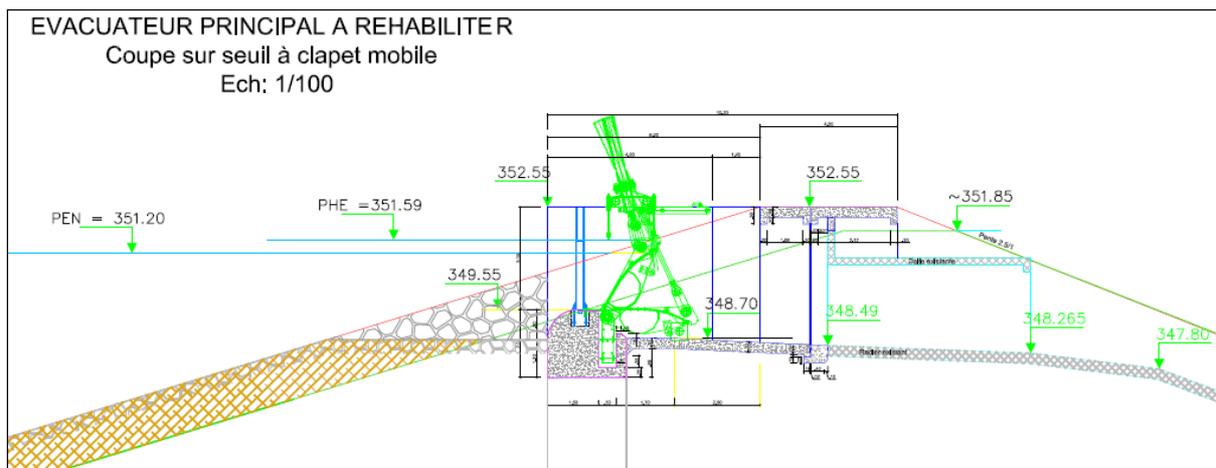
Le fonctionnement des Hausses Fusibles respecte les contraintes suivantes :

Aucune hausse fusible ne bascule avant la crue centennale,

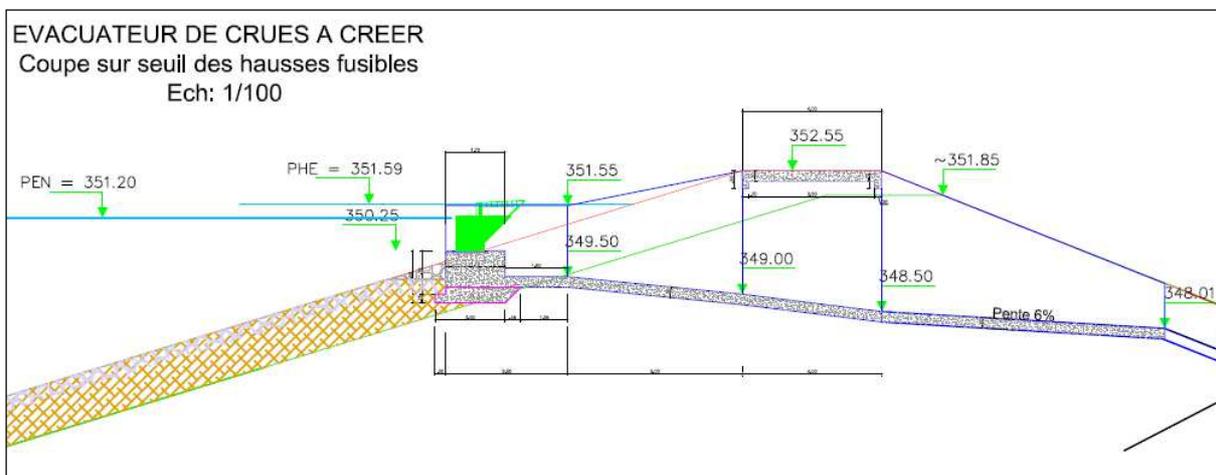
La crête des hausses est calée 5 cm au-dessus du nouveau niveau d'exploitation, de telle sorte que le nouveau déversoir ne fonctionne qu'en cas de crue importante,

La restitution des débits de crue à l'aval est progressive.

Les schémas ci-après montrent la conception de ces deux évacuateurs.



Graphique 6 : Solution 1 - Rajout d'un clapet mobile sur l'évacuateur de crues existant



Graphique 7 : Solution 1 - Evacuateur de crues secondaire pourvu de hausses fusibles

4.2 Scénario 2 - Rehausse fixe du déversoir existant complétée par un évacuateur de crues secondaire muni de rehausses fusibles

Ce second scénario consisterait simultanément à :

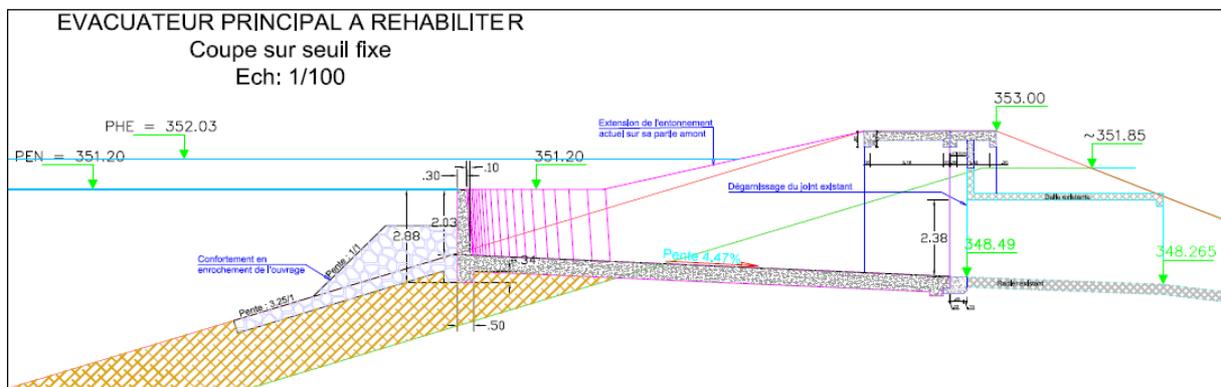
Une rehausse de la digue de l'ordre 1.20 m permettant d'augmenter le PEN de 1.15 m et de stocker 500 000 m³ supplémentaires,
 La réhabilitation de l'évacuateur de crue actuel, visant à mettre en conformité le débit maximal absorbé aux Plus Hautes Eaux Exceptionnelles (PHEE) avec la capacité avérée de l'ouvrage de 33 m³/s,
 La création d'un évacuateur secondaire, équipé de Hausses Fusibles, positionné entre l'ouvrage actuel et la rive droite, capable d'évacuer les débits correspondant à des événements exceptionnels.

Le fonctionnement des Hausses Fusibles respecte les contraintes suivantes :

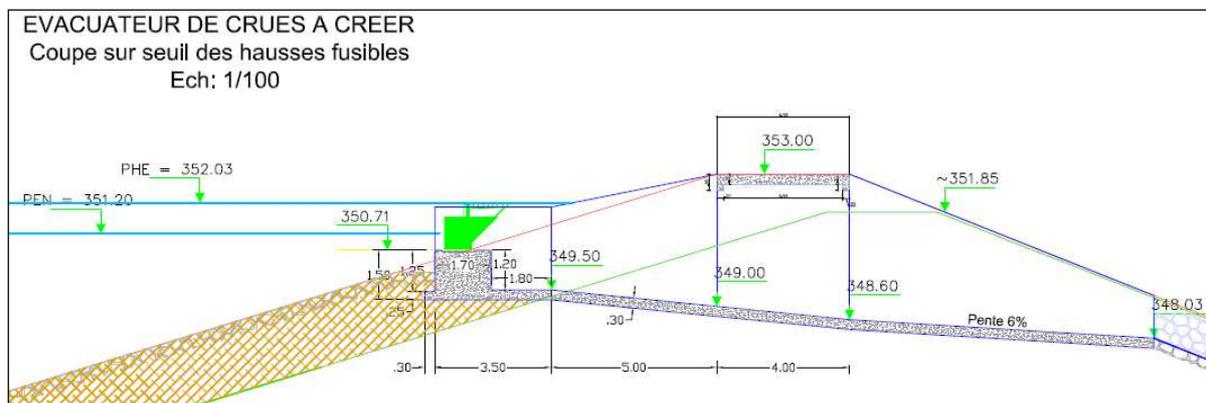
Aucune hausse fusible ne bascule avant la crue centennale,

La restitution des débits de crue à l'aval est progressive.

Les schémas ci-après montrent la conception de ces deux évacuateurs.



Graphique 8 : Solution 2 - Rehausse fixe du déversoir de l'évacuateur de crues existant



Graphique 9 : Solution 2 - Evacuateur de crues secondaire pourvu de hausses fusibles

4.3 Scénario 3 - Reconstruction d'un unique évacuateur de crues en lieu et place de l'ouvrage existant

Pour ce troisième scénario, aucun évacuateur secondaire n'est construit et l'évacuateur existant est entièrement déconstruit, puis reconstruit en créant un seuil fixe combiné avec des Hausses Fusibles.

Les principes généraux de cette conception sont :

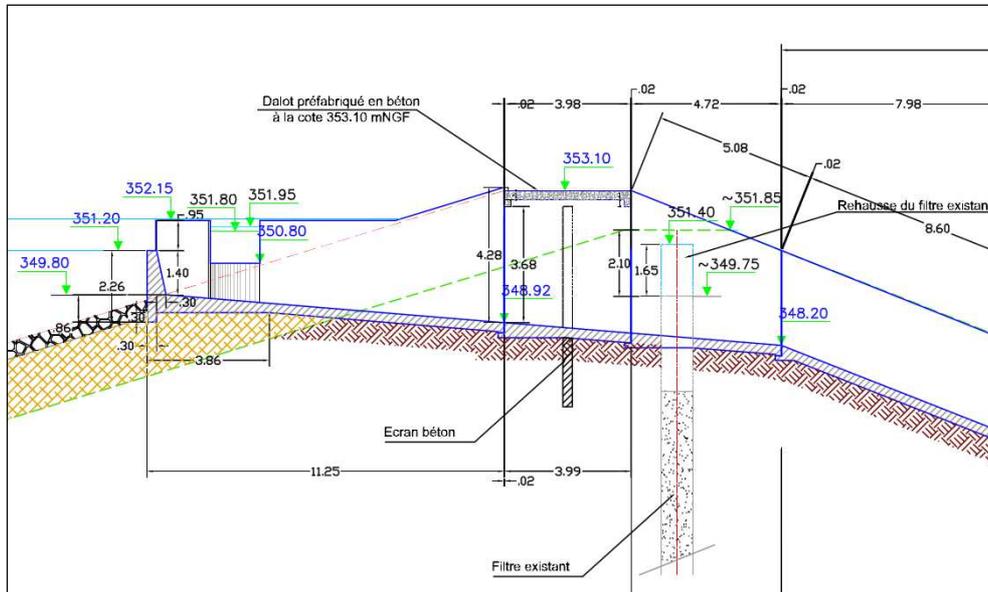
Une rehausse de la digue de l'ordre 1.20 m permettant ainsi d'augmenter le PEN de 1.15 m et de stocker 500.000 m³,

La réhabilitation de l'intégralité de l'évacuateur existant de manière à évacuer la totalité du débit laminé. Il s'agira de combiner un déversoir fixe avec un dispositif de Hausses Fusibles en amont d'un unique entonnement.

Le fonctionnement des Hausses Fusibles respecte les contraintes suivantes :

- Aucune hausse fusible ne bascule avant la crue centennale,
- La restitution des débits de crue à l'aval est progressive.

Le schéma ci-après montre la conception de cet évacuateur.



Graphique 10 : Solution 3 - évacuateur de crues unique équipé d'un déversoir élargi pourvu de hausses fusibles

4.4 Synthèse des scénarios considérés

4.4.1 Caractéristiques principales des ouvrages

Le tableau qui suit permet d'appréhender pour chaque scénario analysé la nature des adaptations techniques envisagées sur les différentes parties de l'ouvrage ainsi que les principales caractéristiques dimensionnelles proposées.

Aménagements correspondant aux scénarios de rehausse étudiés				
		Solution n°1	Solution n°2	Solution n°3
Digue				
Rehausse crête de digue	m	+0.65m	+1.10m	+1.20m
Côte mini de crête de digue	mNGF	352,55	353,00	353,10
Volume de remblai supplémentaire	m ³	16 500	31 400	35 000
Mise en place d'un muret pare-vagues		Non	non	non
Ouvrages annexes				
Evacuateur de crues actuel				
Seuil et entonnement amont				
Type		Clapet mobile asservi au plan d'eau	Déversoir fixe	Mixte déversoir fixe+hausses fusibles

A modifier		Oui	oui	oui
Cote du seuil amont	mNGF	351,20	351,20	351.20/351.40
Longueur déversante	ml	7,50	21,38	15.07/2x4.58
Coursier				
A modifier		non	non	Oui – réfection intégrale
Bassin de dissipation				
Type		Enrochement	Enrochement	Enrochement
A modifier		oui	oui	oui
Volume de dissipation supplémentaire	m3	900	550	800
Volume	m3	1600	1250	1500
Evacuateur de crues complémentaire				
Nécessité de création		oui	oui	non
Seuil et entonnement amont				
Type		Seuil fixe équipé de hausses fusibles	Seuil fixe équipé de hausses fusibles	so
Cote du seuil amont	mNGF	351,25	351,70	so
Longueur déversante	ml	10.5	10.5	so
Coursier				
A créer		oui	oui	so
Longueur	ml	41	41	so
Bassin de dissipation commun avec ouvrage existant		Oui	oui	so

Tableau 1

4.4.2 Résultats hydrauliques obtenus

Pour chacune des trois solutions étudiées, des simulations ont permis d'appréhender les principaux paramètres hydrauliques qui apparaissent ci-dessous :

Résultats hydrauliques obtenus pour les différents scénarios étudiés				
		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Digue				
Rehausse de la crête de digue	m	0.65	1.10	1.20
Cote mini de crête de digue	m NGF	352.55	353.00	353.10
Situation actuelle au PEN				
Cote du plan d'eau	m NGF	350.05	350.05	350.05
Volume stocké	m ³	2 020 000	2 020 000	2 020 000
Surface noyée	ha	37.55	37.55	37.55
Crue de projet initiale (1/1000 ans)	m ³ /s	55.00	55.00	55.00
Situation actuelle au PHEE				
Cote du plan d'eau	m NGF	351.59	351.59	351.59
Surface noyée	ha	42.40	42.40	42.40
Revanche ultime	m	0.59	0.59	0.59
Situation projet au PEN				
Cote du plan d'eau	m NGF	351.20	351.20	351.20
Volume stocké	m ³	2 520 000	2 520 000	2 520 000
Gain en volume	m ³	500 000	500 000	500 000

Surface noyée	ha	41.30	41.30	41.30
Crue de projet actualisée (1/5000 ans)	m ³ /s	69.00	69.00	69.00
Situation de projet au PHEE				
Cote du PHEE	m NGF	351.59	352.03	352.13
Surface noyée au PHEE	ha	42.40	44.00	45.00
Revanche totale	m	1.35	1.80	1.90
Valeur nécessaire	m	0.95	0.95	0.95
Valeur effective	m	0.96	0.97	0.97
Débits évacués				
Débit total	m ³ /s	63.00	55.00	59.00
Evacuateur de crue actuel	m ³ /s	33.00	28.00	59.00
Evacuateur de crue complémentaire	m ³ /s	33.00	27.00	so
Revanche				
Revanche totale	m	1,35	1,80	1,90
Revanche ultime				
Valeur nécessaire	m	0,95	0,95	0,95
Valeur effective	m	0,96	0,97	0,97

Tableau 2

A partir de ces éléments, l'analyse comparative qui fait suite permet de retranscrire à la fois au plan technique et économique l'incidence du PHEE sur les emprises foncières à acquérir, du débit aval évacué sur le cout du ou des ouvrages d'évacuation.

5. ANALYSE COMPARATIVE ET CHOIX DU SCENARIO DEFINITIF

5.1 Critères techniques

La solution 1 pose le problème de la descente de charge importante répercutée par les clapets sur une fondation qui de surcroit risque de tasser significativement au droit des paliers scellés sur un radier rigide.

Les solutions 2 et 3 sont quant à elles relativement proches du point de vue du fonctionnement hydraulique en crue.

Un unique bassin de dissipation constitue un avantage important pour le scénario 3 en regard des incertitudes d'interactions entre les 2 jets convergeant en pied de digue que seul un modèle physique permettrait de lever.

Par ailleurs, il apparaît moins risqué de modifier l'ouvrage existant en restant au maximum dans les emprises de l'évacuateur actuel. Cette solution permet ainsi d'éviter de terrasser un nouveau coursier dans le corps du barrage en remblai, et en outre d'avoir à gérer les problèmes de raccordement de celui-ci sur le bassin de dissipation de l'évacuateur principal.

Au plan technique, le scénario reposant sur la création d'un ouvrage unique de capacité suffisante semble de loin la plus pertinente. Pour le maître d'ouvrage, celle-ci permet de surcroit de « disposer d'un ouvrage entièrement neuf », ce qui constitue un avantage indéniable en termes de maintenance.

5.2 Calendrier de travaux

Les contraintes d'exploitation ne permettent pas de démarrer les travaux de rehausse du parement amont du barrage avant le début du mois de septembre afin de répondre aux deux usages estivaux du réservoir que sont le soutien d'étiage et l'irrigation.

Par ailleurs, ils doivent se dérouler sur un délai relativement court afin de ne pas différer le début de la période de renouvellement des ressources et de limiter ainsi le risque de pertes d'exploitation en année n+1.

En dernier lieu, l'analyse hydrologique saisonnière a montré que les travaux ne pouvaient en aucun cas s'échelonner au-delà du mois de février, faute de quoi l'hydrogramme de la crue de chantier à considérer poserait un problème de sécurité en phase chantier.

Les délais prévisionnels de réalisation des travaux ont par conséquent été apprécié de manière détaillé pour chacune des solutions techniques considérées. Ils ont respectivement été évalué à :

8 mois pour la solution 1,
6 mois pour la solution 2,
6 mois pour la solution 3.

En regard de la fenêtre de tir restreinte liées aux contraintes d'exploitation de la retenue listées précédemment (Août - Janvier), seules ces 2 dernières solutions restent envisageables.

5.3 Approche économique

Sur la base des éléments techniques précédents, une analyse comparative a été menée dans le but de mettre en évidence les conséquences économiques inhérentes aux 3 scénarios de rehausse étudiés. Les résultats sont présentés sur le tableau 3 qui permet notamment de confronter les coûts respectifs des travaux à engager ainsi que les incidences financières d'origine foncière.

Désignation	Scénario n°1	Scénario n°2	Scénario n°3
<i>Travaux</i>	<i>1 571 185</i>	<i>1 513 118</i>	<i>1 460 357</i>
Installation & repli de chantier	150 000	142 000	120 000
Digue	420 000	495 000	516 200
Evacuateur de crues	680 000	540 000	495 550
Cours d'eau aval	27 500	27 500	27 500
Plan d'eau	70 000	93 200	93 200
Imprévis et divers (10%)	134 750	129 770	125 245
Actualisation (6%)	88 935	85 648	82 662
<i>Foncier</i>	<i>48 970</i>	<i>74 635</i>	<i>74 635</i>
Achat	35 000	55 950	55 950
Négociation	5 970	5 970	5 970
Acquisition	8 000	12 715	12 715

Tableau 3

Cette analyse montre clairement que les 3 solutions d'aménagement étudiées sont relativement similaires au plan économique : respectivement 1 620, 1 588 et 1 535 k€ HT au total. Même si le scénario n°3 basé à la fois sur le réaménagement complet de l'évacuateur actuel et sur une rehausse de la digue de 1.20 m s'avère être le moins coûteux, les écarts constatés restent faibles.

A la lueur des conclusions précédentes, le gestionnaire a souhaité écarter la solution n° 1 qui s'avère particulièrement défavorable du point de vue de l'exploitation du barrage et qui nécessite de surcroît une maintenance importante des systèmes hydrauliques de commande ainsi que des vannes clapets et des automatismes.

Il est à noter que le montant total de dépenses serait de l'ordre de 1,8 M€ HT pour des travaux engagés en 2013, ce qui correspond approximativement à un coût d'investissement de 3.60 €/m³ dont approximativement la moitié est liée à la mise en sécurité induite de l'ouvrage conformément aux normes actuelles.

5.4 Contour du scénario retenu

La solution 3 a été retenue pour son intérêt économique et pour sa sûreté de réalisation comparée à une solution comportant deux évacuateurs de crue indépendants.

Elle consiste à rehausser la digue d'une hauteur de 1.20 m pour porter son élévation en crête à 353.10 mNGF, à installer un évacuateur de crue se composant d'un déversoir à seuil libre circulaire à la cote 351.20 mNGF, et de placer de part et d'autre 6 Hausses Fusibles chacune d'une hauteur de 1.00 m, la crête étant portée à la cote 352.15 mNGF.

Pour améliorer la précision du niveau d'eau déclenchant le basculement des Hausses Fusibles et pour minimiser le risque que des embâcles se trouvent bloqués sur le seuil, des puits déportés et protégés, seront installés sur la partie externe des murs bajoyers. Afin de réduire les délais de réalisation, les hausses seront intégralement préfabriquées en atelier.

Concomitamment aux travaux de rehausse de la digue, le coursier ainsi que le bassin de dissipation seront modifiés pour permettre le passage du débit de la crue de sûreté.

Les travaux sont programmés à partir de mi 2013 pour une durée de 6 mois.

6. CONCLUSIONS

Les opérations d'aménagement relatives à l'augmentation de la capacité de réservoirs existants doivent faire face à de nombreuses contraintes de mise en œuvre. Parmi les plus fréquentes, on peut citer les contraintes foncières liées à la nécessaire extension des emprises foncières en périphérie de plan d'eau, mais également celles inhérentes à l'exploitation sachant que les travaux programmés doivent pénaliser le moins possible le fonctionnement courant des ouvrages.

Un autre point clé concerne la sécurité de l'ouvrage pendant la phase de réalisation des travaux de rehausse qui est le plus souvent fortement lié au délai et à la période de mise en œuvre des solutions techniques proposées.

Par ailleurs, dans la plupart des cas, ce type d'opération s'accompagne, notamment pour les ouvrages anciens, d'une nécessaire mise en sécurité du barrage conformément à la réglementation actuelle, ce qui peut impacter significativement la faisabilité économique du projet.

Dans le cas du barrage du Rustaing, une démarche reposant sur une appréciation fine des contraintes et l'analyse comparatives de plusieurs solutions techniques a permis de faire émerger la solution optimale à la fois pour le maître d'ouvrage et pour l'exploitant. Celle-ci a conduit à retenir la rehausse du barrage en remblai, de la déconstruction de l'évacuateur de crue central existant et la reconstruction d'un nouvel ouvrage équipé de hausses fusibles.

Les résultats de cette conception répondent parfaitement aux objectifs recherchés par la CACG tant en termes de sûreté qu'en termes de contraintes d'infrastructures, d'investissement et de coûts d'exploitation.

Le projet résultant permet à la fois de sécuriser le fonctionnement d'un ouvrage ancien ne répondant plus aux obligations actuelles et d'augmenter la capacité du réservoir, autorisant ainsi la valorisation de 500 000 m³ supplémentaires.