CONFORTEMENT DU BARRAGE DE CENNE-MONESTIES

Rehabilitation of the Cenne-Monestiés dam

Jean-Louis POUYTES,
maire de Cenne-Monestiés de 2016 à 2020, 5 Rue de la Mairie, 11170 Cenne-Monestiés, France
jean-louis.pouytes@wanadoo.fr

Johan JANTZEN,
GEOS INGENIEURS CONSEILS SA, 4 chemin des papillons, CH 1216 COINTRIN, Suisse
johan.jantzen@geos.ch

MOTS CLEFS

Barrage en maçonnerie, tirants d'ancrage précontraints, consignes de gestion des crues

KEY WORDS

Masonry dam, prestressed tie rods, flood management instructions

RÉSUMÉ

Le barrage de Cenne-Monestiés est un barrage poids en maçonnerie construit en 1883 pour subvenir aux besoins en eau de l'industrie textile, puis utilisé pendant plusieurs années comme seule source d'alimentation en eau potable du village. L'ouvrage de 22 m de haut est localisé dans le département de l'Aude au sud de la Montagne Noire sur la rivière du Lampy. Le barrage est la propriété de la commune qui compte environ 400 habitants. Sa stabilité est considérée, à plusieurs reprises, comme précaire. Il est renforcé en 1964 par 19 tirants d'ancrage précontraints de 150 tonnes. Puis, une révision de sa stabilité en 2006 a conduit à abaisser le seuil de l'évacuateur de crue pour augmenter la capacité d'évacuation et abaisser la cote de retenue normale.

L'étude de dangers réalisée en 2014 intègre plusieurs études complémentaires (actualisation de l'hydrologie, révision de la stabilité) et conclut à un risque inacceptable de rupture du barrage, avant la crue centennale, et avec une grande partie des enjeux exposés qui se situent dans le village de Cenne-Monestiés qui serait atteint très rapidement par l'onde. Dans l'attente de la décision quant au devenir du barrage, des consignes de gestion des crues sont mises en place, prévoyant l'évacuation des avaliers dès les crues de temps de retour 20 ans, de sorte à garantir des délais d'évacuation suffisants avant l'atteinte de la cote de dangers.

À partir de 2018, les prises de décisions pour le devenir du barrage s'accélèrent. Les habitants sont consultés à ce sujet et souhaitent à une grande majorité maintenir cet ouvrage à valeur patrimoniale. La mairie, très impliquée, obtient les subventions pour les travaux. Les travaux de raccordement de la Commune au Syndicat Sud-Oriental des Eaux de la Montagne Noire sont également lancés. À la fin de l'été 2019, la retenue est vidée et les travaux de confortement démarrent ; la stabilité du barrage est renforcée par 20 tirants d'ancrages de 300 tonnes chacun, le parement amont est rejointoyé, des vannes de prise d'eau sont remplacées et le dispositif d'auscultation est renforcé. Ces travaux sont marqués par une crue importante qui remplit la retenue en une demi-journée et nécessite, par précaution, l'évacuation des avaliers. Depuis les travaux, l'auscultation et la surveillance révèlent un bon comportement du barrage. L'étude de dangers post travaux conclut à un risque acceptable et maîtrisé.

ABSTRACT

The Cenne-Monestiés dam is a masonry gravity dam built in 1883 for the textile industry, then used for several years as the village's sole source of drinking water. The 22 m-high structure is located in the Aude department, south of the Montagne Noire, on the Lampy river. The dam is owned by the municipality, which has a population of around 400. Its stability has been considered precarious on several occasions. In 1964, it was reinforced with 19 prestressed 150-tonne tie rods. A review of its stability in 2006 led to the lowering of the spillway sill to increase discharge capacity and lower the normal retention level.

The hazard study carried out in 2014 incorporates several additional studies (updated hydrology, stability review) and concludes that there is an unacceptable risk of the dam bursting for a flood with a return period of less than 100 years, with a large number of people exposed in the village of Cenne-Monestiés, which would be hit very quickly by the wave.

Pending a decision on the future of the dam, flood management instructions have been put in place, providing for the evacuation of people downstream from floods with a 20-year return period, so as to guarantee sufficient evacuation time before the danger level is reached.

As of 2018, decision-making on the future of the dam has accelerated. Residents were consulted on the subject, and the vast majority wanted to maintain this heritage structure. The Town Hall, which was very involved, obtained subsidies for the work. Work also began on connecting the Commune to the Syndicat Sud-Oriental des Eaux de la Montagne Noire. At the end of summer 2019, the reservoir was emptied and the reinforcement work began; the stability of the dam was reinforced by 20 anchor bolts weighing 300 tonnes each, the upstream face was repointed, water intake gates were replaced and the monitoring system was strengthened. These works were marked by a major flood, which filled the reservoir in half a day and necessitated the evacuation of the people downstream as a precautionary measure. Since the work was carried out, monitoring and surveillance have shown that the dam is performing well. The post-works hazard study concludes that the risk is acceptable and under control.

1. PRESENTATION DU BARRAGE

Le barrage de Cenne-Monestiés est un barrage poids en maçonnerie brute de granite avec mortier de chaux hydraulique, encastré dans un affleurement de granite franc, tant dans les fondations que sur les rives. Il présente une légère courbure en plan (rayon de 250 mètres). La hauteur au-dessus du terrain naturel est de 22 m pour un volume de retenue normale de 100 000 m^3. L'épaisseur en crête est de 4 m ; en pied elle est de 13 m.

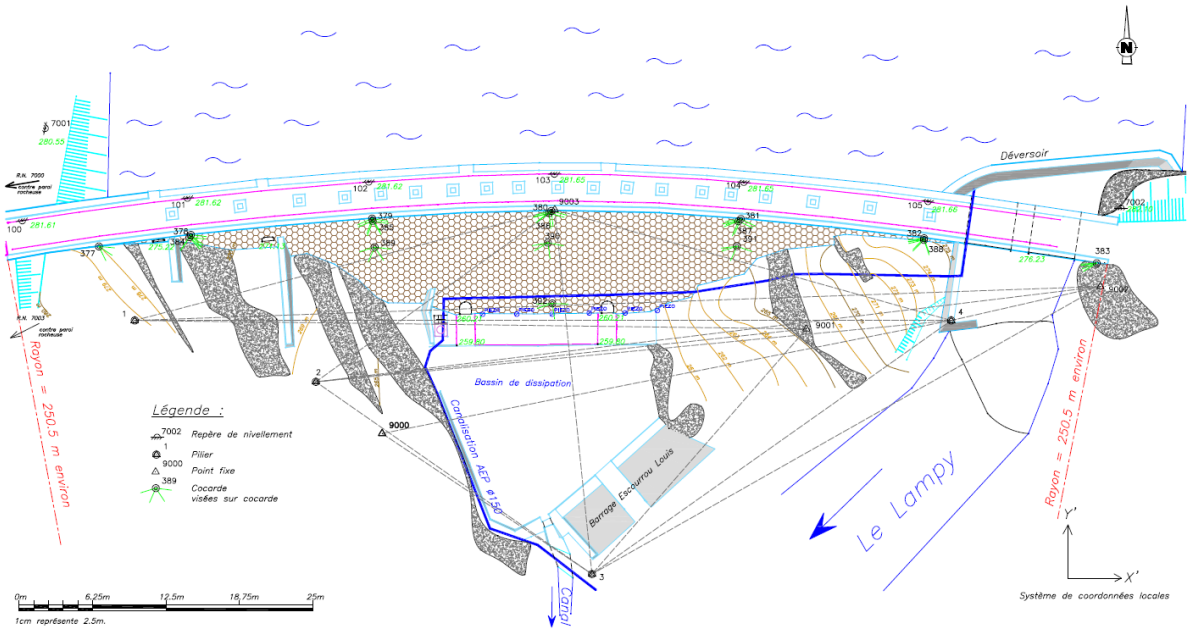

Figure 1 : Vue en plan du barrage de Cenne-Monestiés (Hyp-Arc)

Le système d'évacuation des crues est composé d'un évacuateur de crue en rive gauche de l'ouvrage, avec un seuil-déversoir de 19 m de longueur, implanté juste en amont du barrage. Le passage au droit du barrage se fait par 2 arches voutées séparées par une pile. L'eau est ensuite évacuée par un coursier avec un écoulement à l'air libre s'étalant sur environ 6 mètres, avant de chuter le long de la falaise dans la vallée à l'aval du barrage. Le barrage de Cenne-Monestiés est également équipé de quatre pertuis étagés de vidange. Les quatre galeries associées à ces pertuis sont similaires, de plein cintre de 1 m de largeur et 1,25 m de hauteur, équipées de vannes amont manoeuvrées à l'aide d'un cric à crémaillère depuis le couronnement.

Figure 2 : Barrage de Cenne-Monestiés -parement aval en 2016

Le profil type est inspiré des principes développés par les ingénieurs Delocre, Graeff, Krantz et Sazilly. Le barrage a été conçu suivant le principe d'égale résistance (contraintes de compression en parement amont et aval les plus uniformes possibles pour les cas de charge à vide et à retenue normale), sans considération sur les sous-pressions, phénomène méconnu à l'époque. La forme de l'ouvrage a fait l'objet d'un ajustement entre le rapport de l'Ingénieur Ordinaire et de l'Ingénieur en chef. L'ingénieur en chef suggérant la disparition du fruit amont (déport prévu de 1,50 mètre du pied amont) pour reporter la matière en pied aval. Le projet, tel que suggéré par l'Ingénieur en chef a été approuvé le 12 août 1882.

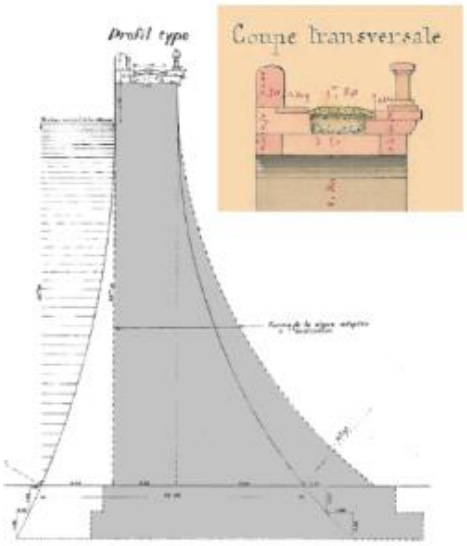

Figure 3 : Coupe type du barrage [1]

Pour la construction du barrage, une maçonnerie de moellons bruts à joints de hasard ou incertains a été adoptée, sans assises régulières, de manière à avoir des pierres dont la plus grande dimension se trouve dans toutes les directions. Le mortier de chaux (chaux hydraulique du Teil) est composé de 400 kilogrammes de chaux en poudre pour un mètre cube de sable. Le massif du barrage a été monté régulièrement sur toute la longueur et la largeur de manière à éviter des tassements inégaux, sans jamais qu'il n'y ait plus de 1,50 mètre de différence de niveau d'un point à l'autre de l'assise de construction. Les archives de la commune [1] font mention des dispositions particulières prises lors de la construction (cimentation des fissures du rocher, retrait des blocs ébranlés, encastrement avec redans sur les rives, nettoyage des surfaces de jonction. Par temps secs, les maçonneries étaient également arrosées légèrement, mais fréquemment afin de prévenir une dessiccation. Dans les temps secs ou dans les temps de pluie, les surfaces des nouvelles maçonneries étaient par ailleurs préservées au moyen de nattes ou de paillassons, …).

1.1.Contexte historique

Barrage

Historique du XXe siècle

L'historique du barrage est très bien documenté [1]. Dès la mise en eau, des fuites ont été observées à l'aval du barrage ; elles donneront lieu en 1896 à un rejointoiement du parement amont, qui permettra une réduction sensible des fuites. Des analyses réalisées en 1897 montrent que les fuites restantes proviennent essentiellement de la fondation en rive gauche et transitent dans le corps du barrage. Ces fuites se sont progressivement colmatées, jusqu'en 1910, où une forte crue a entraîné une nouvelle augmentation des débits de fuite (lors de cette crue, la retenue a dépassé la cote de 280 m NGF (il s'agit de la principale crue recensée). La commune a alors demandé des subventions pour un nouveau rejointoiement du parement amont. Ce rejointoiement sera finalement rejeté le 10 octobre 1913 par le rapport de l'Ingénieur qui recommande un traitement de la fondation et un enduit global sur le parement amont (qu'il justifie par la porosité des moellons de granite, mais qui ne sera pas réalisé).

Une révision de la stabilité de l'ouvrage est menée en 1917. Dans cette note de stabilité figure également un historique des différentes discussions quant au moyen de supprimer les fuites observées. Un rejointoiement est à nouveau suggéré. Les archives de la commune ne permettent pas de confirmer si ce rejointoiement a été réalisé. Les calculs de stabilité de 1917 considèrent une lame d'eau de 1,30 mètre sur le seuil (environ 279.70 m NGF) pour la crue de projet ; l'effet des sous-pressions n'est pas pris en compte dans le calcul. Il faut attendre une nouvelle étude de stabilité de 1963/64, à la demande du Ministère de l'Agriculture, pour que ces sous-pressions soient prises en compte. L'étude conclut sur un défaut de stabilité de l'ouvrage et conduit à la mise en place de travaux de sécurisation réalisés en 1964 :

- Réalisation de 19 tirants précontraints à 150 tonnes dans le corps du barrage, ancrés de 6,5 m dans le rocher (câbles STUP de 12 torons de ½"), espacement des tirants : 3 m en zone centrale et 4 à 6 m en rives pour satisfaire la règle du tiers central et la résistance au glissement. Ces tirants, scellés sur toute leur longueur (pour les protéger contre la corrosion), prennent appui après mise en tension, sur des massifs de répartition en béton armé qui sont placés en saillie sur le couronnement de l'ouvrage.
- Rejointoiement du parement amont sur une surface d'environ 245 m^2. Il est également précisé que 85 m^3 de vase avaient été retirés au préalable en pied de barrage,
- Régénération de la maçonnerie à l'amont sur une épaisseur de 4 mètres par injection à partir de forages verticaux réalisés depuis la crête de l'ouvrage (23 forages espacés de 3 à 4 mètres). Ces forages pénètrent de 1 à 2 m dans le rocher afin de traiter également le contact barrage/fondation. 89 tonnes de ciment CLK (usine de Decazeville de la Société des ciments de Biache St-Vaast) sont injectées. La maçonnerie restait de bonne qualité. Cela représentait moins de 15 kg de ciment par m^3 de maçonnerie ; hormis sur un forage central qui a pu atteindre 30 kg/m^3.
- Réalisation de 7 drains verticaux en pied aval (6 drains de 8,5 mètres de longueur et 1 drain de 7 m de longueur).

Figure 4 : Barrage de Cenne-Monestiés – crête avec plot des têtes de tirants historiques - 2012

Historique récent

Un diagnostic comprenant une étude de stabilité 2D a été réalisée par le CEMAGREF en 2002. Cette étude recommandait la réalisation d'un diagnostic plus approfondi du barrage et recommandait d'instrumenter le barrage par un pendule inversé en précisant que la partie irréversible des déplacements serait « *représentative du vieillissement des tirants par perte de tension, voire par rupture suite à la corrosion* ». En attendant ces études, un abaissement de 2 m du niveau de la retenue a été instauré par manœuvre des vannes. Le barrage de Cenne Monestiés a fait l'objet d'un suivi progressivement renforcé à partir de 2005 :

- Mise en place d'un dispositif de suivi topométrique à partir de 2005 ;
- À l'été 2009, le suivi du barrage a été complété par la mise en place d'un pendule inversé et d'un piézomètre à partir de la crête de l'ouvrage.

Dès 2006, à la suite d'une étude de stabilité menée par EDF (CIH), qui prend en compte les effets 3D [5], la stabilité de l'ouvrage en crues en crue a été jugée précaire en raison des incertitudes sur les tensions résiduelles dans les tirants (les calculs considèrent au mieux 2/3 de la tension initiale) et d'une approche hydrologique simplifiée. Le rapport décennal de 2006 du CEMAGREF [4] réalisé après une vidange complète de la retenue reprend les conclusions de cette étude et recommande un abaissement de la cote de retenue normale, non plus par manœuvre des vannes mais par démolition du seuil de l'évacuateur de crues. Cet abaissement a été réalisé en 2009 au moyen de la destruction partielle du seuil en amont du déversoir sur une hauteur de 1,50 mètre.

Figure 5 : Seuil de l'évacuateur abaissé - 2013

Préalablement à l'étude de dangers du barrage, une révision de l'étude de stabilité d'EDF est imposée par l'administration, dans le but à la fois de prendre en compte les informations apportées par les forages mais également les données auscultées. Cette étude de stabilité de 2012 [5] a redéfini les limites de stabilité de l'ouvrage et a permis, par une analyse de sensibilité sur la cote de la retenue, de déterminer les limites acceptables de stabilité du barrage, tenant compte des incertitudes sur les paramètres de résistance. La cote de danger est fixée à 279,50 m NGF. Un modèle 3D a été réalisé qui a permis de mettre en lumière un léger transfert de charges du centre vers les rives, mais sans permettre d'apporter des informations supplémentaires sur l'éventuelle tension résiduelle dans les tirants historiques.

Historique des usages du barrage et de l'alimentation en eau potable du village

Le barrage de Cenne-Monestiés avait été construit en 1883 pour subvenir aux besoins en eau de l'industrie textile. La commune de Cenne-Monestiés a été pendant longtemps un site industriel, de 1600 jusqu'à 1950. Dès 1600, l'industrie textile s'implante, utilisant l'eau de la rivière comme force motrice et des petits barrages sont construits sur le Lampy. En 1782, les habitants de Cenne et de Monestiés tentent d'empêcher la construction d'un barrage sur le haut bassin du Lampy, connu aujourd'hui sous le nom de « barrage du Lampy », au motif qu'il risquerait de priver les deux communes de leur source d'énergie. En ce sens, ils adressent une pétition au roi. Toutefois, les eaux étant affectées par le pouvoir souverain à l'alimentation du Canal du Midi, il ne fut pas donné suite à ces revendications. Les deux communes sont réunies par décret le 10 avril 1805 et ce n'est qu'en 1882 que Cenne-Monestiés obtient une déclaration d'utilité publique lui permettant de construire son propre barrage sur le Lampy. Les activités industrielles, teintureries, usines de délainage, peuvent alors reprendre, mais cessent après la seconde guerre mondiale.

Concernant l'alimentation en eau potable, la commune de Cenne-Monestiés a été longtemps autonome ; en extrémité du territoire couvert par le Syndicat Sud-Oriental des Eaux de la Montagne Noire, elle n'était pas raccordée au syndicat mais profitait de ses propres ressources. L'alimentation en eau potable de la commune de Cenne-Monestiés a longtemps reposé sur la source des Trois Evêques. Il s'agit d'un captage d'eau de source naturelle. Cette source était utilisée depuis 1937. Des analyses ont toutefois révélé en 2011 une pollution de cette source par du bromacil, d'où le raccordement du réseau d'eau potable au barrage.

2. ETUDE DE DANGERS DU BARRAGE

2.1. Données d'entrée

L'étude de dangers de 2014 [8] s'appuie sur plusieurs études réalisées entre 2012 et 2014, notamment :

- L'étude de stabilité de 2012 [5] qui inclut plusieurs études de sensibilité dont une étude de sensibilité de la tension résiduelle dans les tirants (2/3 de la tension initiale et calculs sans tension) ;
- Une étude hydrologique réalisée en 2014 [6] ;
- Une étude d'onde de rupture du barrage de 2014 [7].

2.2. Démarche d'analyse de risques

Pour l'étude de dangers du barrage, les différents scénarios pouvant libérer de l'eau à l'aval du barrage ont été étudiés. Les probabilités d'occurrence des différents scénarios ont été classées selon la grille de probabilité utilisée en ICPE pour la caractérisation des scénarios d'accidents, grille présentée dans le guide de lecture des études de dangers de barrages de 2012.

Niveau	E	D	C	B	A
Fréquence associée	**< 10^{-5}** Possible mais extrêmement peu probable	**< 10^{-4}** Très improbable	**< 10^{-3}** Improbable	**< 10^{-2}** Probable	**> 10^{-2}** Courant
Niveau Qualitatif	N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations	S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité	S'est déjà produit dans secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	S'est déjà produit et/ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'installation	S'est produit sur site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctrices

Figure 6 : Echelle de probabilité d'occurrence

La gravité des conséquences a été déterminée en fonction de l'échelle présentée ci-dessous qui dénombre les personnes exposées à la libération de tout ou partie de l'eau de la retenue, en dissociant sur la base d'un avis d'expert la zone à cinétique rapide (premiers enjeux atteints dans un temps trop court pour permettre une mise à l'abri des personnes exposées) de la zone à cinétique lente (possibilité d'alerte et d'évacuation des populations).

Classes de gravite des conséquences (par ordre décroissant)	Nombre de personnes exposées en zone à cinétique rapide	Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente
5 : Désastreux	N > 1 000	N > 10 000
4 : Catastrophique	1 000 > N >100	10 000 > N > 1 000
3 : important	100 > N > 10	1 000 > N > 100
2 : sérieux	10 > N >1	100 > N >10
1 : modéré	-	10 > N > 1

Figure 7 : Echelle de gravité

La probabilité et la gravité ont été croisées en considérant la matrice de criticité suivante, proposée par l'organisme agréée et partagée par le maître d'ouvrage, en considérant trois niveaux de risques (acceptable en vert, intermédiaire en orange, inacceptable en rouge).

probabilité	A courant >10^{-2}					
	B : probable <10^{-2}					
	C : improbable <10^{-3}					
	D : très improbable <10^{-4}					
	E : extrêmement peu probable <10^{-5}					
		1 : modéré	2 : sérieux	3 : important	4 : catastrophique	5 : désastreux
		Gravité				

Figure 8 : Matrice de criticité

2.3.Résultats de l'étude de dangers

L'étude de dangers conclut à un risque essentiellement présent en cas de rupture du barrage (les faibles conséquences des libérations d'eau par les galeries (ouverture intempestive de vanne, rupture) ont conduit à juger le risque comme « acceptable »). Sur la base de l'hydrologie actualisée, il a été conclu que les recommandations de stabilité en crues ne sont pas remplies pour ce barrage. Ce constat s'impose au vu :

- Du sous-dimensionnement initial du barrage par la non-prise en compte des sous-pressions, phénomène méconnu à l'époque de sa conception ;
- Du possible vieillissement des tirants d'ancrage qui sont venus conforter le barrage en 1964, qui ont dépassé 50 ans, et qui, dès l'origine, ont été entièrement scellés sur toute leur hauteur sans qu'il soit ainsi possible d'estimer leur tension résiduelle ;
- De la revue à la hausse des débits de crue (de l'ordre de 30%) et de la revue légèrement à la baisse des capacités d'évacuation de l'évacuateur de crue [19].

Les études hydrauliques et de stabilité concluent à l'impossibilité de démontrer la stabilité du barrage pour des crues de temps de retour inférieurs à 100 ans, en situation extrême ; par ailleurs, même en considérant la pleine tension dans les tirants, les critères de stabilité de l'arrêté technique barrage de 2018 n'étaient plus vérifiées). L'étude d'onde de rupture conclut par ailleurs à une exposition de 300 à 350 personnes, dont plusieurs habitations sur la partie basse du village de Cenne-Monestiés. Situé entre 1,5 km et 2 km à l'aval du barrage, le village serait atteint par l'onde en moins de 10 minutes. La cinétique est rapide ; le niveau de gravité est qualifié de « catastrophique ». De probabilité A et de gravité 4, le risque de rupture du barrage en crue est jugé inacceptable (zone rouge de criticité).

3. SUITES DONNEES A L'ETUDE DE DANGERS

Les résultats de l'étude de dangers incitaient à sécuriser le barrage et à prendre des mesures d'urgence préalablement à d'éventuels lourds travaux de sécurisation.

3.1.Mesures provisoires

Réflexion sur le niveau de retenue

Il est de bonne pratique de prévoir un abaissement provisoire de la retenue en attendant d'éventuels travaux de sécurisation. Pour le barrage de Cenne Monestiés, un tel abaissement avait déjà été réalisé en 2009 en abaissant le seuil de l'évacuateur de crue. Seul un abaissement minime du seuil était encore envisageable et avec un effet négligeable sur les niveaux d'eau atteints en crues. L'intérêt d'un abaissement supplémentaire de la retenue voire sa vidange complète a par ailleurs été examiné mais rapidement écarté :

- Cette vidange n'offrait aucune sécurité supplémentaire par la très faible capacité de laminage de la retenue (de l'ordre de 100 000 m^3), pour des volumes de crues supérieurs à 2 millions de m^3 (dès la crue centennale) ;
- Seule la stabilité du barrage en crue avait été jugée préoccupante ; les marges de stabilité étaient très confortables pour la RN déjà abaissée.

Consignes de gestion des crues

En attendant des prises de décision concernant le devenir du barrage, des consignes de gestion des crues ont été instaurées [9]. Ces consignes ont profité du travail réalisé en amont :

- Les études hydrauliques permettaient d'appréhender la cinétique des crues ;
- Les études de stabilité permettaient de préciser la cote de danger au-delà de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'était plus garantie ;

- La connaissance de la population exposée avec une cinétique rapide a permis à la commune de progressivement mettre en place un dispositif d'alerte téléphonique de la population exposée au sein du village et des mairies des communes plus en aval : ce dispositif permettait l'envoi d'un message vocal téléphonique à partir de seuils de retenue prédéfinis, avec renvoi de l'alerte jusqu'à confirmation de sa bonne prise en compte.

Une première version des consignes a été élaborée en 2014. Ces consignes séparaient l'état de crue, l'état d'alerte de la population, l'état d'évacuation de la population et l'état de dangers. Il avait été statué en première approche qu'un délai de l'ordre de 2h était nécessaire à l'alerte et à l'évacuation des avaliers, avant atteinte de la cote de dangers. Pour garantir des délais suffisants, en tenant compte de la cinétique estimée des crues, l'évacuation était prévue dès l'atteinte d'une cote de retenue d'occurrence 20 ans ; cote 75 cm sous la cote de danger (cf. figure ci-après). La gestion de l'ouverture des vannes avait également été réfléchie pour optimiser les délais.

Plusieurs échanges ont eu lieu avec les services de l'Etat sur les délais nécessaires. Un test grandeur nature de gestion des crues et d'alerte des populations a été réalisé le 6 juin 2018 (commune(s) et SPC). A l'issue de ce test, les cotes ont finalement encore été abaissées pour se donner une sécurité supplémentaire.

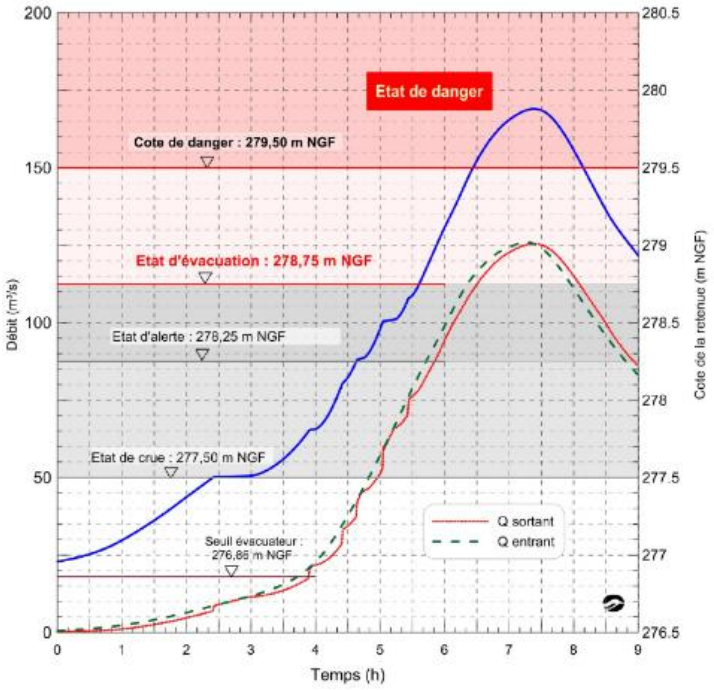

Figure 9 : Gestion des crues de 2015 à 2019 (sur la base de la simulation de la crue centennale)

3.2.Etudes du devenir du barrage

Dès le chapitre 9 de l'étude de dangers, des ébauches de solution de confortement du barrage ont été abordées (nouveaux tirants d'ancrage, recharge aval). Deux solutions de mise en sécurité ont été pré-chiffrées en mars 2016 [11] :

- La première solution consistait à renforcer l'ouvrage par des nouveaux tirants d'ancrage ;
- La seconde solution consistait à un effacement du barrage, avec renaturation du site au droit du barrage et dans l'emprise de la retenue.

L'opération de déconstruction des 6500 m^3 de maçonnerie aurait pu s'avérer financièrement intéressante pour la commune par une possible revalorisation de la maçonnerie et une subvention de l'agence de l'eau à hauteur de 50%, qui n'était toutefois pas garantie dans le cadre du calendrier prévu (l'agence de l'eau ne pouvait s'engager pour des travaux au-delà de 2018).

La prise de décision entre le maintien et la déconstruction a été une décision complexe qui a duré plusieurs années, notamment en raison du coût des travaux pour une commune de 400 habitants et de l'importance

capitale que constituait la retenue pour l'alimentation en eau potable. Il était impossible d'imaginer l'abandon du barrage sans une autre solution d'alimentation en eau potable et compliqué de faire accepter les travaux, ceux-ci nécessitant une vidange qui priveraient la commune de cette source d'alimentation sur plusieurs mois.

Le conseil municipal a pris le dossier de l'eau à bras le corps en engageant les démarches pour :

- Que la commune de Cenne-Monestiés soie raccordée au Syndicat Sud-Oriental des Eaux de la Montagne Noire et ne soit plus dépendante du barrage pour cette source d'alimentation (l'eau du barrage était par ailleurs de faible qualité) ;
- Le choix soit arrêté entre le confortement et l'effacement du barrage.

Les habitants de Cenne-Monestiés ont été consultés pour connaître leur position sur le devenir du barrage. Une réunion publique d'informations a eu lieu le 6 avril 2018 ; le 15 mai 2018 le conseil municipal a entériné la décision des habitants du maintien du barrage à plus de 83 % des votants. Ce résultat témoigne de l'importance patrimoniale de cet ouvrage, que de nombreux habitants ont rappelée lors de la réunion d'informations. Les réunions tenues après cette consultation en présence de l'Etat, du Département, du service de prévention des crues, de la DREAL, de l'Aide Technique Départementale ont permis de rappeler la situation du barrage : aussi bien les risques de rupture en crue, que les dispositions déjà actées pour évacuer les gens avant l'arrivée de la crue et les travaux à réaliser pour sécuriser le barrage. Les échanges ont permis de cadrer les modalités de réalisation et de financement des travaux (pour information coût final des travaux de 1,6 million d'Euro HT, dont 320 000 Euro à la charge de la commune) et d'enclencher les études pour obtenir l'autorisation formelle de ces travaux.

3.3.Projet de confortement du barrage

Dès le choix arrêté de maintenir le barrage, les études de confortement du barrage ont débuté. Le projet de confortement [13] prend en compte les informations nouvelles apportées par les investigations et diagnostics réalisés depuis l'étude de dangers. Un examen technique complet du barrage a notamment été réalisé le 30 mars 2016 [10]. Cet examen est venu renforcer le diagnostic du barrage par une inspection subaquatique des parties habituellement noyées du barrage. Cet examen a notamment mis en lumière la nécessité d'accompagner d'éventuels travaux de confortement de l'ouvrage par des opérations d'entretien de l'ouvrage à retenue vidangée (rénovation des dispositifs de vidange notamment et rejointoiements localisés du parement amont).

Ce projet de confortement s'appuie également sur de nouvelles investigations géotechniques menées en février 2019. Deux sondages carottés ont été réalisés en rive droite du barrage. Ces investigations ont permis de parfaire la connaissance du barrage et de préciser davantage les résistances à considérer pour le barrage et sa fondation. Les investigations ont révélé le bon état du corps du barrage en comparaison d'autres ouvrages de la même époque[17] [18] ; les blocs de granit du corps du barrage sont pour la plupart correctement jointoyés avec le mortier de chaux (bon contact et bonne cohésion avec le mortier). Les injections réalisées en 1964 étaient encore visibles (cf. photographie ci-après). Des vides localisés restent présents et témoignent malgré tout d'un mortier de chaux visiblement altéré et lessivé par endroit.

Figure 10 : Investigations géotechniques de 2019 – carottes révélant les traces des injections de 1964

Le contact du barrage avec le rocher de fondation a été vu dans un état acceptable ; les essais d'eau témoignaient d'un contact peu perméable ; sur les deux forages réalisés, un lessivage de mortier estimé de faible extension avait été observé sur le premier forage avant l'essai ; le deuxième forage a quant à lui révélé un contact parfait (emboitement des éléments, contact sain et non altéré).

La campagne a également été mise à profit pour expertiser le pendule qui révélait un déplacement rive à rive cyclique conséquent peu compréhensible alors que ce pendule était localisé en partie centrale du barrage. L'inspection caméra du forage du pendule a mis en évidence un défaut de réalisation de ce forage qui n'est pas parfaitement vertical. Malgré la position centrale du fil en partie haute, le fil touchait le tubage PVC du forage vers 9,5 m de profondeur à partir de la tête du tube, ce qui faussait les mesures a priori depuis l'origine. Le forage était par ailleurs cimenté par des concrétions ferrugineuses et calciques à partir de 10 m de profondeur. Cela témoigne de l'importance de faire réaliser ces pendules par des entreprises spécialisées.

Le contenu du rapport de projet a fait l'objet de plusieurs échanges avec les services de l'Etat jusqu'à sa remise définitive en avril 2019. Ce rapport a intégré une nouvelle modélisation tridimensionnelle du barrage pour dimensionner les tirants d'ancrage, contrôler le report de charges sur le barrage conforté et justifier du pianotage de mise en tension des tirants. Au final, 20 tirants d'ancrage de près de 300 tonnes chacun était nécessaire pour justifier la stabilité du barrage, nécessitant 600 m de forage.

La section critique la stabilité était celle au contact barrage-fondation (critère déterminant : limiter la fissuration des zones de plus forte hauteur à 25 % de la section en situation exceptionnelle de crue). Les caractéristiques suivantes de cisaillement ont été considérées (contact et maçonneries, sur la base d'essais et d'une approche de type Hoek&Brown) :

- $c_{pointe} = 100\ kPa$
- $\varphi_{pointe} = 45°$

Les autres hypothèses de calculs sont les suivantes :

- Masse volumique de la maçonnerie : 2150 kg/m^3
- Aucune résistante à la traction, ni dans la maçonnerie, ni au contact barrage-fondation.
- Répartition triangulaire des sous-pressions et pleine sous-pression dans la partie fissurée ;
- Espacement des tirants vérifié en tenant compte des reports de charge sur les rives

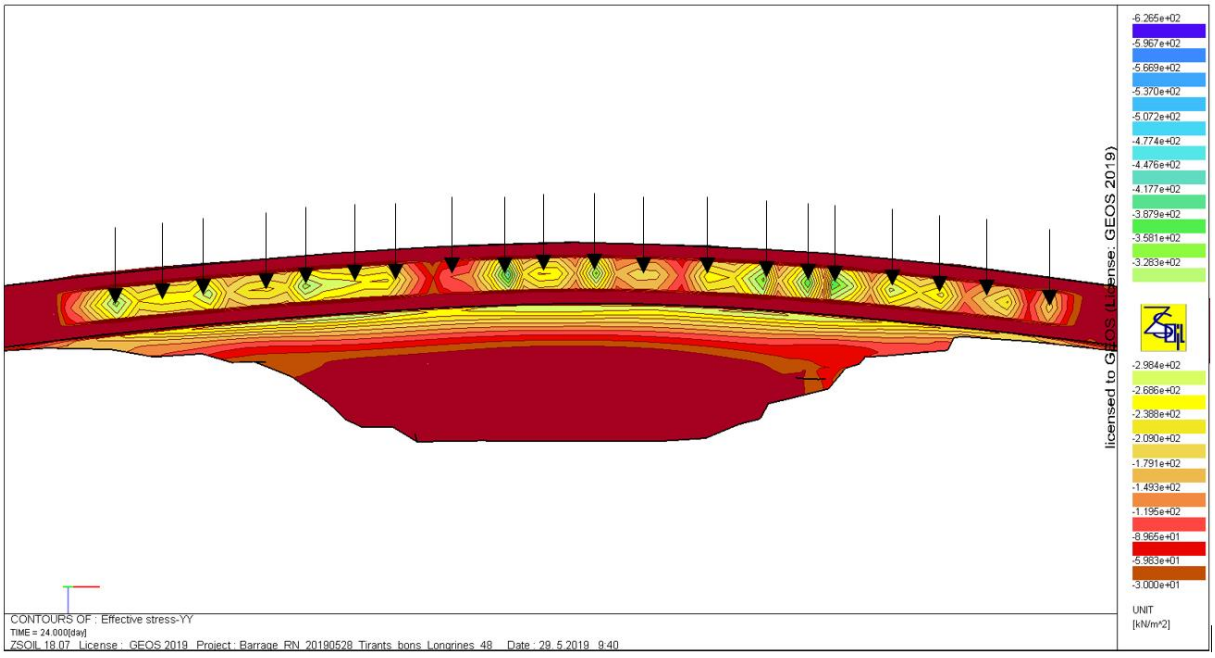

Figure 11 : Modèle 3D avec prise en compte du pianotage de la mise en tension des tirants

3.4.Autorisation des travaux de confortement du barrage

Le dossier d'autorisation des travaux a été réalisé en quelques mois, en parallèle du projet de confortement, de 2018 à 2019. L'étude d'incidence environnementale [14] de la vidange et des travaux a été réalisée par Hydro-M Environnement de novembre 2018 à avril 2019. L'ensemble du dossier a été réalisé dans un délai contraint, les travaux étant considérés comme des « travaux d'urgence » à engager au plus vite dès le raccordement de la commune au SSOEMN.

Certains travaux restaient conditionnés à un diagnostic préalable à réaliser après vidange de la retenue (rénovation ou remplacement de la vantellerie, étendue du rejointoiement). L'étude de dangers a par ailleurs été actualisée après ces diagnostics pour justifier que l'ensemble des travaux réalisés permettaient de revenir à un niveau de sécurité acceptable en permettent notamment de garantir la stabilité du barrage en crue millénale avec les coefficients associés à la situation exceptionnelle de crue. La solution retenue laisse par ailleurs la possibilité, à l'avenir, d'augmenter encore la sécurité de l'ouvrage par une adaptation de l'évacuateur de crues, pour :

- Garantir la stabilité à des crues extrêmes telles que demandées par l'arrêté technique de 2018 pour les nouveaux barrages ;
- Absorber une éventuelle révision à la hausse des débits de crue.

4. PHASE TRAVAUX

4.1. Détails des travaux réalisés

Les travaux ont démarré en septembre 2019 ; ils ont été confiés à l'entreprise Hydrokarst. Les travaux de mise en tension des tirants ont respecté le phasage suivant :

- Etape 0 : tirant d'essai en rive droite
- Etape 1 : découpage des têtes des tirants existants dans l'emprise de la longrine (sans déceler de corrosion significative des armatures), retrait des plots et de la cabane du pendule, de la rive droite vers la rive gauche
- Etape 2 : longrine (excavation + réalisation) – forages – mise en place tirants
- Etape 3 : mise en tension des tirants par pianotage.

Figure 12 : Travaux en crête du barrage, 2019-2020

L'opération de réalisation des tirants a été complexe : des circulations d'eau entre les différents forages ont été repérées dans le rocher en rive gauche du barrage. Ces communications ont nécessité des opérations d'injections préalables puis de reforation jusqu'à obtenir des valeurs de perméabilité acceptables avant mise en place des tirants (des essais d'eau ont été réalisés systématiquement avant chaque mise en place de tirants).

Les travaux ont été impactés par la situation sanitaire (COVID-confinement). Deux personnes de l'entreprise Hydrokarst ont assuré à elles-seules le ferraillage complet de la longrine en crête pendant la période de confinement.

Les travaux ont été adaptés aux caractéristiques du site, difficile d'accès. Le bétonnage de la longrine calé sur une seule journée a nécessité une organisation spécifique pour rythmer la livraison par camions du béton. Un portique d'insertion des tirants a par ailleurs été réalisé sur mesure par Freyssinet, spécifiquement pour ce chantier. Il permettait un cintrage du tirant à l'aplomb du forage.

Figure 13 : Mise en place et mise en tension de nouveaux tirants d'ancrage, 2020

Les travaux intègrent les technologies les plus récentes ; les têtes installées sur les tirants sont notamment toutes « évolutives ». Elles peuvent être démontées et remises en tension, notamment pour remplacer une cellule, ou au besoin pour instrumenter une nouvelle tête. Sept tirants ont été équipées d'une cellule dynamométrique FreyssiCell.

Après la vidange de la retenue, le parement amont a fait l'objet d'une inspection complète par cordistes pour repérer les ressuyages et les joints abîmés. Les joints ont été contrôlés à l'aide d'un marteau de géologue, de manière régulière et systématiquement dans les zones de ressuyage et de joints abimés. Les zones de joints dégradés (sonnant creux ou présentant des ouvertures) ont été identifiées après la vidange. Cette inspection a mis en évidence que les joints historiques sur ce barrage étaient encore dans un excellent état ; ce qui est très rare pour être signalé, vu l'âge de ces joints. Les zones de joints dégradés en ont été reprises sur ce parement et dans les galeries de drainage, en veillant à maintenir l'éventuel caractère drainant de ces galeries.

Figure 14 : Joint du parement amont, 2019

4.2.Crue en phase travaux

Les consignes de gestion des crues ont été révisées pour la phase de travaux à retenue abaissée [15]. Les vannes étaient maintenues complètement ouvertes pendant la phase de travaux ; cette situation permettait de maintenir le plan à bas niveau au démarrage de la crue mais nécessitait de revoir à la baisse les cotes des états de vigilance pour maintenir les délais nécessaires. Le 11 mai 2020, alors que les tirants définitifs n'étaient pas encore en tension (et la longrine excavée mais n'était pas encore bétonnée, soit la situation la plus critique), une crue a entraîné le dépassement des cotes d'alerte et d'évacuation. La cote d'alerte de 263 m NGF a été dépassée à 9h, entraînant une téléalerte des avaliers. La cote d'évacuation de 269 m NGF a été atteinte à 12h15, entraînant l'alerte des autorités et l'évacuation des avaliers.

Le système mis en place a par ailleurs permis à la commune de contrôler à distance la bonne réception des alertes par l'ensemble des avaliers concernés. La retenue est montée pendant cette crue jusqu'au seuil de l'évacuateur de crue, sans toutefois atteindre la cote de danger. La pluie a cessé en début de soirée, mais il a fallu attendre le 12 mai au matin pour constater un abaissement de la retenue jusque sous la cote d'évacuation. A 7h, la retenue était 1,50 m sous cette cote. A 9h, le niveau de la retenue est descendu sous la cote d'alerte et les personnes évacuées ont pu rentrer chez elles.

Les débits conséquents rencontrés en sortie des galeries de vidange de fond ont entraîné un descellement de la rangée de pierres aval en sortie de ces galeries, ainsi que des dégradations du radier aval. Le descellement des pierres aval s'expliquait par l'état dégradé des joints en sortie de voûtes ; il était prévu de reprendre ces joints une fois les tirants mis en tension ; la crue a toutefois devancé cette étape de travaux. Toute la maçonnerie en sortie de voûte a finalement été reprise (certaines pierres n'ont pas été retrouvées, de nouvelles pierres ont été amenées).

Figure 15 : Crue du 11 mai 2020

4.3.Remise en eau de la retenue et étude de dangers post travaux

Depuis la remise en eau, l'auscultation du barrage témoigne d'un comportement satisfaisant du barrage. La piézométrie en rive gauche est un peu plus faible qu'avant les travaux. Les débits collectés par les rigoles ont été revus légèrement à la hausse en rive droite ; cela s'explique selon toute vraisemblance par la remobilisation en crues des sédiments qui tapissaient le pied amont du barrage et limitaient les infiltrations en fondation, et par une meilleure collecte des eaux (réfection des rigoles de collecte). La commune poursuit la surveillance du barrage et respecte par ailleurs un plan d'entretien renforcé des arbres qui bordent la retenue. L'étude de dangers post travaux [16] conclut à un risque de rupture acceptable et maîtrisé ; confirmé par l'administration qui a pour projet le déclassement du barrage ; le barrage avait en effet été maintenu en classe A par les nombreux enjeux aval et le risque que représentait l'ouvrage ; à présent que les travaux sont réalisés, un déclassement en classe B est en projet.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des professionnels ayant pris part aux travaux de confortement. Ils ont œuvré dans la continué des travaux historiques en fournissant un travail remarquable, qui non seulement permet d'assurer la sécurité du barrage mais également sa pérennité.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Archives du barrage : construction à 1964

[2] Diagnostic sommaire et recommandations, Etude CEMAGREF, P. Royet, mai 2002

[3] Rapport d'étude " Analyse du comportement mécanique de l'ouvrage- Barrage de Cenne-Monestiés"- EDF-CIH- Réf IH-CENNE-CMB-GC-ED.00001/A, 2006

[4] Barrage de Cenne-Monestiés, rapport décennal 2006, Cemagref, Paul Royet, Gerard Degoutte, Avril 2007

[5] Etude de stabilité, GEOS, 2012

[6] Etudes hydrologique et d'évacuation des crues, GEOS, juillet 2014

[7] Etude d'onde de rupture, GEOS, 2014

[8] Etude de dangers, GEOS, 2014

[9] Consignes de gestion du barrage, GEOS, avril 2015, modifiées en 2018

[10] Rapport de l'examen technique complet, GEOS, avril 2016

[11] Barrage de Cenne-Monestiés, Mise en sécurité du barrage, Estimation des travaux envisageables, GEOS, mars 2016

[12] Rapport de revue de sûreté, GEOS, 2016

[13] Projet de confortement v2, GEOS, mai 2019

[14] Vidange du barrage de Cenne-Monestiés, étude d'incidences sur l'environnement, Hydro-M Environnement, v3, 2019

[15] Consignes phase travaux, juillet 2019

[16] Etude de dangers v3, GEOS, 2021

[17] 2012, Congrès CIGB, Congrès 24 Kyoto, Question 95 / Rapport 29 / Vieillissement des barrages en maçonnerie, Degoutte G., Bourdarot E., Touileb B., Royet P., Coppel F., Ducos X.

[18] Le parc des barrages français en maçonnerie, techniques de reconnaissance et de confortement, Paul Royet, Frédéric Laugier, Nathalie Rosin-Corre, Pierre Agresti, Akim Salmi