



HAL
open science

Retour d'expérience du démantèlement du barrage de Kernansquillec

I. Derville, M. Bonenfant, P. Royet, D. Lepetit, A. Jigorel

► **To cite this version:**

I. Derville, M. Bonenfant, P. Royet, D. Lepetit, A. Jigorel. Retour d'expérience du démantèlement du barrage de Kernansquillec. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 2001, 25, p. 13 - p. 27. hal-00464504

HAL Id: hal-00464504

<https://hal.science/hal-00464504>

Submitted on 17 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Retour d'expérience du démantèlement du barrage de Kernansquillec

Isabelle Derville¹, Marc Bonenfant², Paul Royet³, Denys Lepetit⁴, Alain Jigorel⁵

Si les barrages modernes sont souvent des ouvrages à buts multiples, les barrages anciens avaient, pour la plupart, une vocation unique.

Il est donc logique, en particulier à l'occasion de la fin d'une concession, que se pose la question du maintien de barrages anciens en mettant en balance leur intérêt socio-économique avec le coût des travaux souvent nécessités par la mise à niveau de leur sécurité, ces ouvrages ayant vieilli tant dans leur structure que dans leur conception.

Le barrage de Kernansquillec illustre cette problématique. La décision de son démantèlement a été prise début 1995. La mise en œuvre en a été complexe, avec une retenue emplie à 50 % de sédiments et de fortes contraintes environnementales en aval du barrage.

Il s'agit de l'un des trois barrages français démolis dans la décennie 1990 (pour les deux autres, voir encadré p. 14) et du premier exemple de ce type présenté lors d'un congrès de la Commission internationale des grands barrages (Royet, 1997).

Description du site et de l'ouvrage

Une vallée bretonne

Le barrage de Kernansquillec se situe sur la commune de Plounevez-Moëdec, à l'ouest du département des Côtes-d'Armor en plein massif armoricain (figure 1, p. 14). Il se trouve dans la vallée étroite et encaissée du Léguer, l'une des plus belles rivières de Bretagne, de première ca-

tégorie, classée à poissons migrateurs. Saumons et anguilles remontent le Léguer jusqu'au barrage qui crée un obstacle très difficilement franchissable.

Le bassin versant d'une surface de 280 km² comprend deux massifs granitiques séparés par une auréole schisteuse métamorphisée. L'érosion qui a lieu sur ce bassin versant entraîne essentiellement des particules sableuses à granulométrie grossière, provenant des arènes granitiques. Les plateaux sont en culture, mais l'espace boisé est conséquent dans les vallées, ce qui limite l'érosion mais entraîne un important apport de matières organiques à la chute des feuilles.

Les sédiments de la retenue du barrage sont donc à granulométrie grossière et très chargés en matières organiques. Ce dernier point impliquera une gestion très précise du curage et de la vidange de la retenue pour limiter les relargages d'ammoniac ; quant à la granulométrie, elle sera un facteur important des bonnes performances de décantation en lagunes des produits curés par aspirodragage.

Description de l'ouvrage et de la retenue

Le barrage fut construit entre 1920 et 1922 afin d'alimenter en électricité une papeterie située en amont du site.

D'une hauteur de 15 m environ sur le terrain naturel, il est constitué de voûtes cylindriques et contreforts minces en béton armé. Les 15 voûtes, inclinées à 45°, présentent un rayon intérieur

Les contacts

1. DIREN – Bretagne
6, cour Raphaël Binet,
35065 Rennes
2. DDAF – Côtes
d'Armor, 1-3, rue du
Parc, BP 2256,
22022 St-Brieuc Cedex
3. Cemagref,
Le Tholonet, BP 31,
13612 Aix-en-Provence
Cedex 1
4. DDE – Côtes
d'Armor, 3, place du
Général-de-Gaulle,
BP 2361, 22023
St-Brieuc Cedex
5. INSA – Rennes
20, avenue Buttes
de Coësmes, 35700
Rennes

Encadré

Deux autres exemples de barrages français démolis

Barrage de Saint-Etienne-du-Vigan (43)

Ce barrage voûte, de 90 000 m³ de capacité et un peu plus de 10 m de hauteur, a été construit par EDF en 1950 en remplacement d'un barrage plus ancien. Non équipé d'ouvrage de franchissement, il est devenu dans les années 90 le dernier obstacle à la remontée des saumons vers les zones de frayères du Haut Allier. Sa démolition a été décidée début 1994 dans le cadre du Plan Loire grandeur nature. Plus de deux ans de négociations ont été nécessaires pour confirmer l'abandon de ce barrage, par ailleurs en bon état de marche et rentable. Deux ans de plus se sont écoulés avant la démolition effective par dynamitage le 24 juin 1998. Les sédiments avaient été préalablement relargués par l'ouvrage de vidange en période de forts débits. Le coût de l'opération s'est élevé à près de 6 MF (0,9 M€), financé par EDF (70 %) et l'Agence de l'eau (30 %) (Plet, 1999).

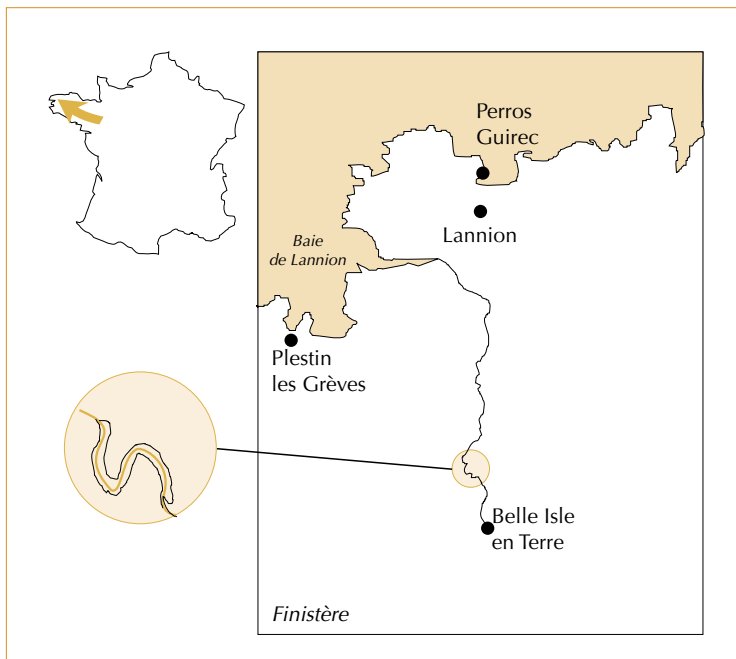
Barrage de Maisons-Rouges (37)

Il s'agit d'un barrage poids de 6 m de hauteur et 300 m de longueur construit en 1919, dont l'exploitation hydroélectrique a été transférée à EDF par la loi de nationalisation de 1946. Établi sur la partie aval de la Vienne, il constituait un obstacle majeur à la migration de plusieurs espèces piscicoles, ses passes à poissons étant inefficaces. Saisissant l'occasion de la fin de concession, le gouvernement a décidé l'effacement du barrage dans le cadre du Plan Loire grandeur nature, début 1994. Quatre années de négociations sur les mesures compensatoires, d'études techniques et de procédures réglementaires ont été nécessaires avant le début des travaux en juin 1998. Le barrage a été démolí progressivement, à l'abri de digues provisoires. Un radier a été maintenu pour éviter une reprise de l'érosion du lit de la rivière. Le montant des travaux s'est élevé à 10 MF (1,5 M€), financé par le ministère de l'Environnement, l'Agence de l'eau et EDF. L'État a en outre apporté un montant équivalent pour financer des mesures compensatoires auprès des collectivités locales (Dulac, Lasserre, 1999 ; DDE 37, 1999).

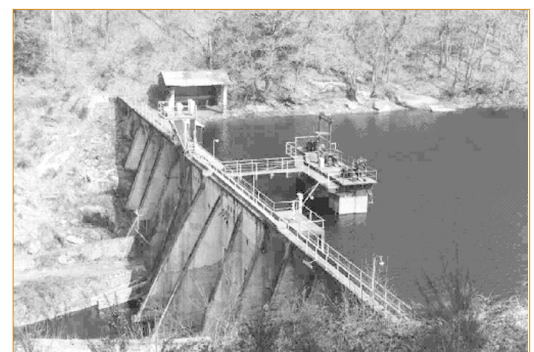
de 2,40 m et une épaisseur de 0,20 m seulement. Les contreforts, inclinés à 70° sur leur face aval, présentent une épaisseur de 0,20 m, s'élargissant

en fondation et sur la face aval. Ils sont contreventés par des entretoises en béton armé de 0,20 x 0,20 m. L'usine, d'une puissance maximale brute de 1 300 kW, est intégrée à l'intérieur des voûtes centrales (photo 1).

Le barrage est doté d'un évacuateur de surface, placé en rive gauche et équipé de deux vannes plates et deux vannes secteur. L'ensemble, toutes vannes relevées, est capable d'évacuer environ 65 m³/s, retenue totalement pleine. La vidange est assurée par deux vannes manœuvrées manuellement depuis l'arrêt de la centrale électrique.



▲ Figure 1 – Plan de situation.



▲ Photo 1 – Le Barrage de Kernansquillec.

La retenue est longue de 1,5 km et située dans une vallée étroite. La capacité de stockage, faible dès l'origine (de l'ordre de 400 000 m³), n'était plus que de 200 000 m³ en 1996 du fait de l'envasement.

Un site très sensible à la dégradation de la qualité de l'eau

Outre la richesse piscicole du Léguer, le site de Kernansquillec présente deux autres contraintes très fortes pour la réalisation des travaux de curage, de vidange et de démantèlement du barrage.

Tout d'abord, une prise d'eau est située à 1,5 km en aval du barrage. Elle alimente une station d'eau potable de 4 000 m³/j de capacité, qui est l'unique point d'alimentation de huit communes.

Ensuite, une importante pisciculture se trouve à 800 m en aval du barrage, et produit 400 t/an de truites. Cette activité est extrêmement sensible à la dégradation de la qualité de l'eau, notamment sur les paramètres : O₂, NH₄ et turbidité.

La décision de démolir le barrage de Kernansquillec

Pourquoi démolir le barrage ?

UN OUVRAGE ABANDONNÉ ET MENAÇANT LA SÉCURITÉ DES POPULATIONS SITUÉES EN AVAL

Le barrage de Kernansquillec a cessé son activité le 31 décembre 1993 lors de la fin de la concession accordée à une société privée qui n'a pas souhaité la renouveler. En effet, cette concession délivrée pour une puissance maximale brute de 1 300 kW ne pouvait être renouvelée en l'état, la loi n° 80-531 du 15 juillet 1980 soumettant la poursuite des activités des ouvrages d'une puissance inférieure à 4 500 kW à autorisation préfectorale.

Or, cette dernière aurait imposé un certain nombre de contraintes de mise en conformité et le respect de la législation des débits réservés que, ni la société détentrice de l'ancienne concession, ni aucun autre repreneur n'ont jugé réalisables dans un contexte de rentabilité économique.

Les contraintes de mise en conformité technique ont notamment été établies après des études réalisées dès 1988 par le Cemagref et le laboratoire régional des Ponts et Chaussées. Les principales conclusions de ces études étaient les suivantes :

Un évacuateur de crues largement sous-dimensionné

L'exploitation des données hydrologiques disponibles et l'étude hydraulique de l'évacuateur de crues ont amené à conclure que la capacité de l'évacuateur toutes vannes relevées était de 65 m³/s pour une retenue affleurant la crête de l'ouvrage (photo 2). Cela correspond environ au débit de pointe de fréquence décennale. C'est donc au moins à un doublement de la capacité d'évacuation des crues qu'il fallait procéder, sans compter l'indispensable modernisation des systèmes de vannage, jugés vétustes, peu fiables, et dangereux pour le personnel d'exploitation (photo 3).

Des organes de vidange vétustes

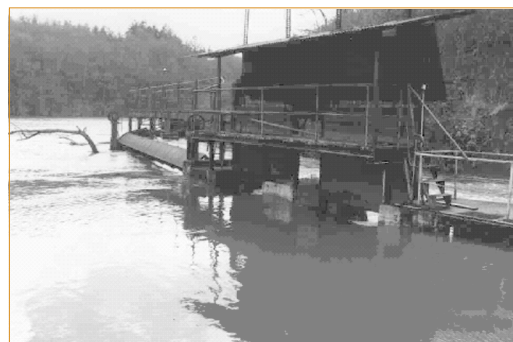
Les deux conduits de vidange ne comportaient pas de double vannage ni de grilles de protection. En outre, les vannes, difficiles et longues à manœuvrer, présentaient des fuites et un médiocre fonctionnement hydraulique.

Une stabilité précaire en cas de surverse

La conception de l'ouvrage conduisait à des contraintes supportables pour le béton. Cependant, le risque avéré de surverse laissait craindre des affouillements pouvant causer la déstabilisation des fondations.



◀ Photo 2 – Un évacuateur de crue sous dimensionné (crue du 25 janvier 1995).



◀ Photo 3 – Des équipements hydrauliques vétustes (crue du 25 janvier 1995).

Un béton apparemment sain malgré quelques défauts localisés

En comparaison à d'autres barrages semblables et de la même époque, le béton de Kernansquillec apparaissait visuellement de bonne qualité. Les fuites étaient très faibles dans les voûtes, plus importantes au travers de la fondation granitique, mais sans caractère alarmant. On constatait seulement quelques défauts localisés : armatures apparentes sur plusieurs entretoises, dépôts de calcite et traces de rouille en certains points des voûtes, signes localisés de carbonatation. On verra que ce diagnostic visuel relativement rassurant a été infirmé lors de la démolition qui s'est révélée particulièrement aisée.

Lorsque l'ouvrage est revenu dans le domaine public de l'État au 1^{er} janvier 1994, il nécessitait d'importants travaux d'urgence. L'année 1994 fut une année de recherche vaine d'un reprenneur potentiel du barrage.

L'hiver 1994-1995 fut déterminant pour la prise de décision du démantèlement d'urgence du barrage de Kernansquillec. En effet, l'ouest de la France vécut un hiver de crues et d'inondations. Le Léguer connut fin janvier des débits atteignant 80 m³/s, et le barrage fut sur le point de surverser. Face à ce risque et après avis du Cemagref et du BETCGB (Industrie), le préfet décida l'évacuation temporaire des habitants situés à l'aval de l'ouvrage.

UN OUVRAGE SITUÉ SUR UNE RIVIÈRE CLASSÉE À POISSONS MIGRATEURS (SAUMONS, ANGUILLES)

La circulation des poissons migrateurs était très mal assurée au niveau du barrage de Kernansquillec : le fonctionnement de l'ascenseur à poissons, pourtant rénové en 1989, n'a jamais été totalement satisfaisant et, de toutes façons, l'installation était hors service depuis l'arrêt de l'usine fin 1993.

Les associations de protection de la nature demandaient donc le démantèlement du barrage, devenu un véritable obstacle à la migration des poissons.

Ainsi, pour des raisons de sécurité des populations, et pour des raisons liées à la valeur piscicole de la rivière, le préfet demanda le démantèlement d'urgence du barrage, décision prise par le Premier ministre, Edouard Balladur, en avril 1995.

Des opposants au projet de démantèlement

La décision de détruire le barrage de Kernansquillec souleva une opposition locale relayée par l'une des collectivités. Beaucoup de nostalgie pour un ouvrage qui représentait l'activité florissante de presque un siècle (papeteries) semblait à l'origine de cette opposition.

Les services de l'État durent organiser plusieurs réunions d'information avec les maires et les riverains, afin d'expliquer le projet. Ces réunions se sont poursuivies pendant tout le chantier.

Une association locale pour suivre le projet

En revanche, l'Association pour la protection et la mise en valeur du Léguer composée d'une majorité de maires et de divers usagers de la vallée (associations de protection de la nature, pêcheurs, associations de canoë-kayak) soutenait le projet. Son action, avec l'appui de la DDAF, fut double :

- informer régulièrement la population de l'avancement des travaux durant toute l'opération (6 mois) : exposition en mairies mise à jour régulièrement, réunions d'information ;
- assurer la maîtrise d'ouvrage de l'étude de la réhabilitation du site après démantèlement : aménagement paysager, valorisation touristique.

Diagnostic préalable et méthode choisie

Étude des sédiments

La précédente vidange réalisée sur l'ouvrage datait de 1988. Elle fut catastrophique pour le milieu en aval et dut être écourtée. Le constat d'un fort envasement de la retenue avait donc été fait. Les premiers chiffres annoncés étaient de 30 à 50 % du volume utile de la retenue.

La première démarche a donc été d'évaluer par sondage et carottage le niveau d'envasement et la nature des sédiments de la retenue (Jigorel, 1997).

Les épaisseurs de sédiments ont été mesurées sous eau selon douze profils transversaux (figure 2) par l'emploi combiné d'une sonde de profondeur et d'une perche graduée d'une longueur maximale de 6 m. Dans la partie aval du réservoir, trop profonde pour la réalisation de mesu-

res directes, la puissance des dépôts a été évaluée par la différence entre la cote présumée du fond de la retenue et la cote de l'interface eau sédiment. L'étude a montré que les sédiments étaient répartis sur toute la surface. Les épaisseurs maximales variaient de 2,5 m en queue de retenue à 3,5 m à l'amont immédiat du barrage. Le taux moyen annuel de sédimentation dépassait donc 5 cm/an dans les secteurs les plus envasés.

La queue de retenue, totalement comblée par les sédiments, était exondée et végétalisée sur la moitié de la longueur du réservoir. De ce fait, la sédimentation n'y était active que pendant les périodes de crues. Les dépôts s'accumulaient sur les bords latéraux du chenal où une abondante couverture végétale jouait le rôle d'un piège à sédiment, accélérant ainsi le comblement. Le volume total de sédiments a été évalué à 200 000 m³.

Quarante échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide d'une drague manuelle et par sondages pour analyses au laboratoire : granulométrie, minéralogie, teneur en matière organique et masse volumique.

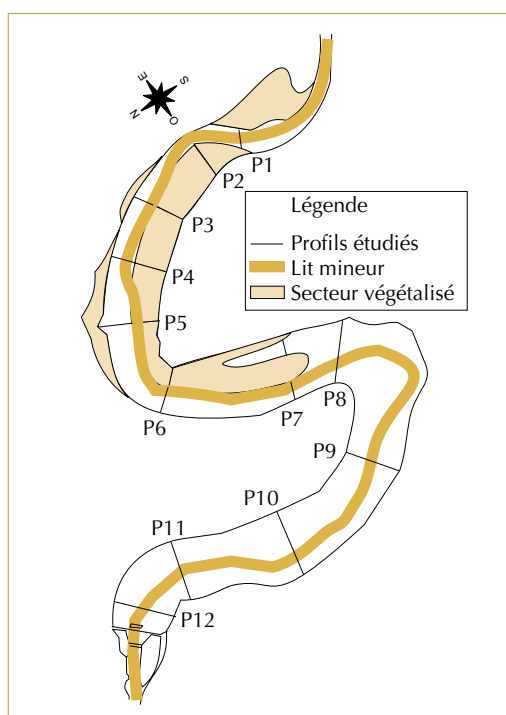
Dans le chenal, les sédiments présentaient un gradient granulométrique longitudinal. Les graviers (2-20 mm) associés à des sables grossiers (0,2-2 mm) dominants dans la partie amont laissaient place vers l'aval à des sédiments moins grossiers et comportant une proportion croissante de sables fins (0,02-0,2 mm). Sur les berges végétalisées à l'amont, les sédiments, à l'aspect d'un mille-feuille, présentaient une alternance régulière de lits de sable et de lits de feuilles peu dégradées. La fraction fine argilo-limoneuse associée au sable augmentait régulièrement en s'éloignant du chenal.

Dans la partie en eau du réservoir, les sédiments, relativement homogènes, étaient constitués de sable fin associé à une fraction fine argilo-limoneuse. Un léger gradient granulométrique longitudinal et transversal a été mis en évidence. La proportion de sable fin diminuait à la fois vers l'aval et vers les bords latéraux au fur et à mesure que l'on s'éloignait du chenal.

Choix de la méthode de gestion des sédiments

Deux types de solutions ont été envisagés :

1 - *La solution curative* consistait à réaliser la vidange tout en relâchant les sédiments à travers



◀ Figure 2 – La bathymétrie du réservoir de Kernansquillec.

le barrage. Le piégeage devait se faire dans un ou plusieurs ouvrages de décantation en aval, dont les dimensions nécessaires se sont vite avérées incompatibles avec la topographie de la vallée. De plus cette solution n'offrait pas toutes les garanties vis-à-vis de la sensibilité des enjeux à l'aval.

2 - *La solution préventive*, consistant à gérer d'abord les sédiments puis à vidanger la retenue, a été préférée. L'enchaînement en était le suivant :

- hydrocurage préalable du lit mineur avec abaissement progressif du niveau de la retenue ;
- vidange finale associée à la création de petits seuils décanteurs en aval du barrage ;
- démolition du barrage jusqu'au plancher de l'usine avec constitution d'un seuil.

Le maintien d'un seuil au droit du barrage s'est avéré nécessaire vis-à-vis des risques d'érosion régressive qui pouvaient intervenir après la démolition. En effet, des photographies réalisées au moment de la construction de l'ouvrage ont montré d'importants terrassements et remblais dans le lit du Léguer en amont immédiat du barrage, facteurs d'instabilité potentielle.

D'une hauteur de 2,50 m, ce seuil situé au droit de l'ancien plancher de l'usine a été équipé d'une passe à poissons réalisée grâce à quatre petits pré-barrages dotés de brosses pour la migration des anguilles.

Le cadre réglementaire

Compte tenu des impératifs de sécurité des populations en aval, le préfet décida une procédure d'urgence pour l'exécution de la vidange du barrage en s'appuyant sur l'article 34 du décret 93-742 du 29 mars 1993 pris en application de la loi 92-3 du 3 janvier 1992. Sans enquête publique, un compte rendu fut réalisé conformément à cet article 34. Le conseil départemental d'Hygiène fut saisi. Un arrêté préfectoral a prescrit les modalités de l'opération et les mesures compensatoires définies à la suite des études préalables.

La loi du 29 décembre 1892 sur les dommages causés à la propriété privée par l'exécution des travaux publics, était adaptée à ce cas de figure, ou les procédures d'utilité publique auraient pu être utilisées, mais n'auraient pas répondu à l'urgence de l'intervention.

L'occupation temporaire sur deux années des terrains destinés aux lagunes de décantation des boues hydrocurées a été acquise à l'amiable auprès des propriétaires privés grâce à des conventions prévoyant les indemnités suivantes :

- les indemnités sur les terres agricoles ont été calculées sur les barèmes calamités agricoles ;
- les indemnités sur les peuplements forestiers ont été définies sur la valeur d'avenir de ces peuplements.

L'accès aux rives pour la gestion des seuils décanteurs, créés dans le lit du Léguer afin de minimiser l'incidence des travaux, a été obtenu par application d'une servitude de passage au titre de l'article 119 du Code rural.

Enfin, la démolition de l'ouvrage a été autorisée par arrêté du préfet au titre des articles L 430.1 et suivants, R 430.1 et suivants du Code de l'urbanisme.

Hormis l'opposition d'une collectivité, le consensus obtenu sur l'opération a permis la mise en œuvre de procédures amiables et la réduction des délais administratifs normalement prévus. L'article 34 du décret 93-742 du 29 mars 1993 a donc pu être utilisé dans de bonnes conditions.

Programme des travaux

Phase 1 - Curage avec décantation et vidange partielle de la retenue

Le principe retenu est le curage par aspirodragage des vases liquides et des sédiments à l'aide d'une drague, la retenue étant maintenue en eau. Les produits curés sont évacués par une conduite vers des lagunes de décantation. En sortie de lagunes, les eaux sont rejetées directement dans le Léguer. L'aspirodragage s'est déroulé d'amont en aval et conjointement à l'abaissement lent du plan d'eau, de manière à d'une part dégager progressivement les berges mises à sec, et d'autre part permettre le travail d'aspirodragage sous 5 à 6 m d'eau, portée maximale de la drague.

LE CURAGE

Le matériel utilisé était une drague IHC Beave de 425 CV (photo 4), équipée de cutters, avec un débit de pompage de 300 l/s. La drague travaillait par bandes parallèles et longitudinales par rapport à la retenue sur une demi largeur de chenal. La tête de pompage étant équipée d'un cône de protection, la remise en suspension dans la retenue est restée faible.

Le dragage fonctionnait alternativement 5 et 4 jours par semaine au rythme de 16 heures par jour dans un premier temps, ramené à 8 h par jour en fin de chantier (obligation de satisfaire aux contraintes de qualité des eaux du Léguer après dilution des rejets en lagunes en période d'étiage). L'intégralité du curage sera réalisée sur 4 mois (mai à août 1996).

Il convenait de curer de telle sorte à redécouvrir au final le lit initial de la rivière avant construction du barrage. L'aspirodragage a permis de nettoyer le lit mineur et de taluter les anciennes berges de manière à limiter tout départ de matériaux par effondrement des rives. La pente était de l'ordre de 1 pour 3. Une des difficultés résida en la connaissance de l'emplacement de l'ancien lit de la rivière. L'élément le plus précieux fut l'ancien cadastre, antérieur à la construction du barrage, qui a pu être confirmé progressivement lors des travaux.

Au final, 94 000 m³ de sédiments ont ainsi été dragués sur une bande longue de 1,8 km et large de 30 m maximum.

LA DÉCANTATION EN LAGUNES

Les sédiments curés étaient envoyés dans deux

lagunes successives situées en aval du barrage (photo 5). Elles ont été aménagées par creusement du terrain et construction de digues en terre d'une hauteur de 4 m. La surface totale des lagunes atteignait seulement 3 ha.

Le temps de séjour total de l'eau dans les lagunes n'était que de 1 à 2 jours, permettant toutefois un abattement très significatif des matières en suspension (MES) (photo 6). Les teneurs maximales en sortie du deuxième bassin étaient de 330 mg/l de MES et 30 mg/l de NH_4^+ . La décantation s'est bien effectuée grâce à une granulométrie plutôt grossière des sédiments et grâce à la présence de talus et de haies transversales laissés en l'état dans les parcelles aménagées en lagunes.

Le débit des rejets dans la rivière était modulé par une vanne en fonction des débits de la rivière de telle sorte qu'après dilution, la classe de qualité des eaux du Léguer soit maintenue. Ainsi, les teneurs en MES et en NH_4^+ du Léguer sont généralement restées inférieures à respectivement 25 mg/l et 3 mg/l ; la teneur en oxygène dissous est restée supérieure à 8mg/l pendant toute la durée du curage (figures 3 et 4, p. 20).

La gestion des rejets et des prélèvements d'eau étaient réalisés quotidiennement par la DDAF. Dans ce chantier, il est ressorti que le débit de la rivière imposait le débit de rejet des lagunes et donc le rythme de travail de curage. L'étiage sévère de l'été 1996 a ainsi imposé le ralentissement du dragage à seulement 8 heures par jour.

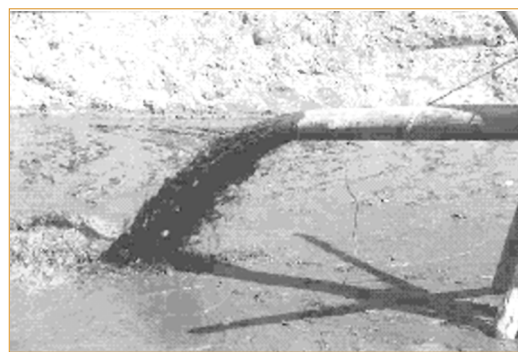
LA VIDANGE PARTIELLE DE LA RETENUE

Durant toute cette période d'aspirodragage et avant la vidange finale, le niveau de la retenue a été progressivement abaissé pour permettre le travail de la drague à 6 m de profondeur maximum, et dégager très progressivement les talus destinés à rester sur place et à former les futures berges de la rivière. Les sédiments ainsi mis à nu étaient progressivement stabilisés par les effets conjugués d'un ressuyage des berges et d'une revégétalisation des terres.

L'abaissement de la retenue s'est effectué selon un rythme moyen de 3 cm par jour (figure 5, p. 21). Le réglage manuel de la vanne de fond du barrage était défini deux fois par jour à partir des informations télétransmises depuis deux stations de mesure, l'une fournissant le débit entrant dans la retenue, l'autre la cote du plan d'eau.



◀ Photo 4 – La barge de curage.

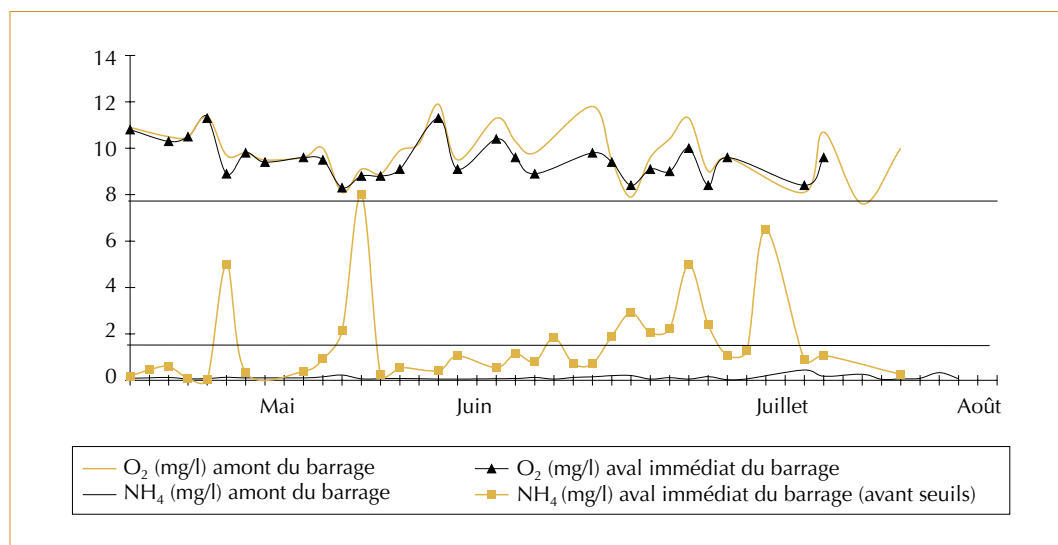


◀ Photo 5 – Rejet en lagune des vases hydrocurées.

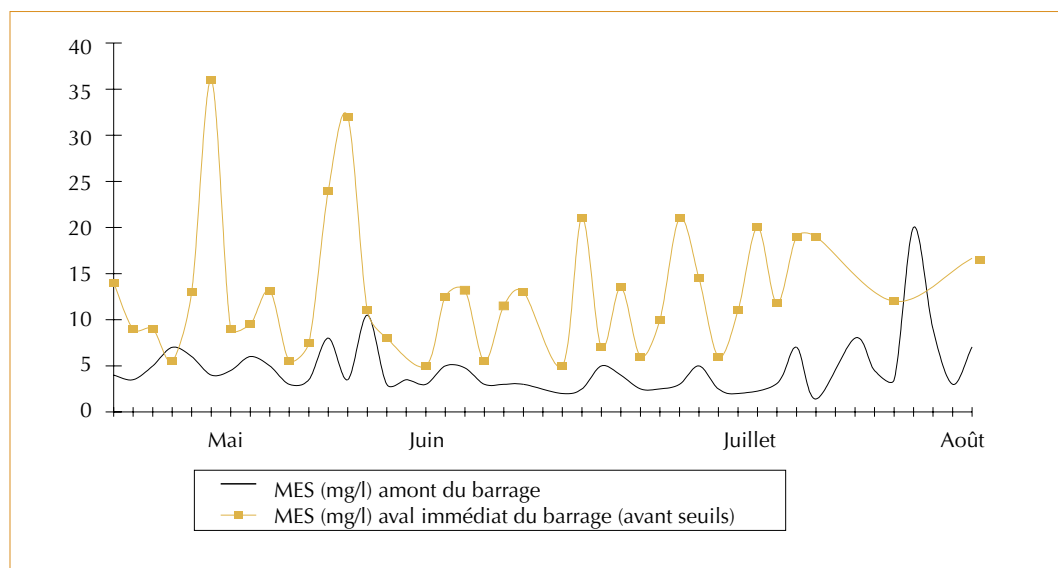


◀ Photo 6 – Rejet aval de la lagune dans le léguer.

► Figure 3 – Suivi qualitatif des eaux du Léguer durant l'hydrocurage (O_2 - NH_4).



► Figure 4 – Suivi qualitatif des eaux du Léguer durant l'hydrocurage (MES).



Phase 2 - La vidange finale

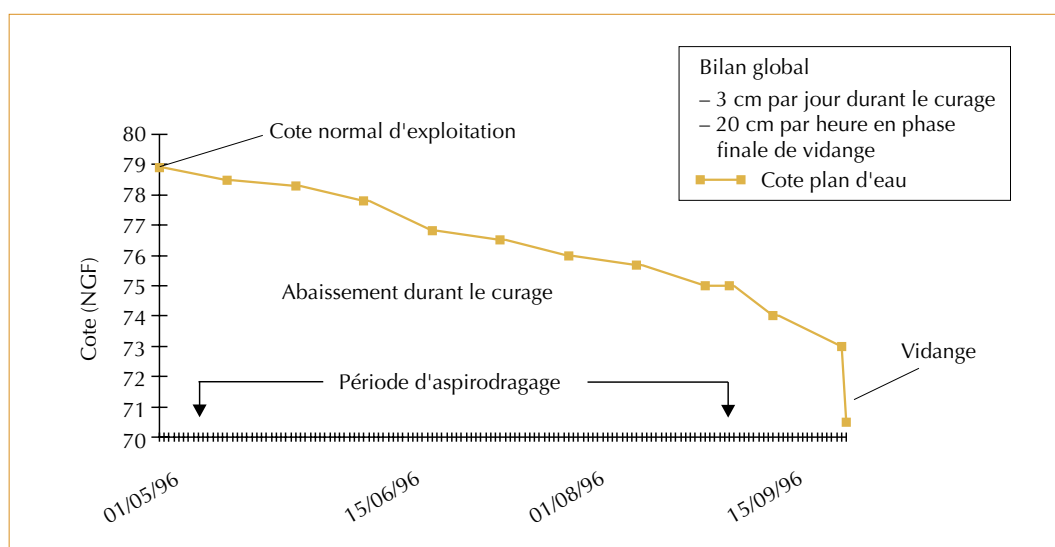
L'abaissement progressif de la retenue durant la phase de curage a permis de laisser une hauteur d'eau de 3 m maximum au droit du barrage à la veille de la vidange finale, réalisée le 30 septembre 1996.

CRÉATION DE SEUILS DÉCANTEURS

Préalablement, quatre seuils avaient été réalisés fin mai 1996 dans la rivière afin de favori-

ser la décantation des sédiments susceptibles d'être mobilisés au moment de la vidange finale.

Ces seuils, d'une hauteur de l'ordre de 1 m, ont été réalisés sur les sites d'anciens déversoirs de moulins pour trois d'entre eux. Appuyés sur les vestiges des déversoirs et réalisés en enrochements, ils ont été recouverts d'un géotextile jouant le rôle de filtre pour bloquer les sédiments. Seul, le premier seuil situé 200 mètres en aval



◀ Figure 5 – Gestion du plan d'eau pendant la durée des travaux (mai à octobre 1996).

du barrage a été en totalité réalisé artificiellement. Leur volume utile a été estimé de 12 000 à 15 000 m³.

LES PÊCHES DE SAUVEGARDE

Décidées au titre de la loi pêche de 1984, deux pêches de sauvegarde ont été réalisées en mai et septembre 1996. La première a permis de sauvegarder les salmonidés sur les sites des seuils. La seconde réalisée 8 jours avant la vidange a permis de déplacer les espèces piscicoles sur les 2 km entre le site du barrage et la pisciculture en aval. L'ensemble de cette population piscicole a été relâché sur le réseau hydrographique en amont du barrage.

LA VIDANGE

Débutée le 30 septembre 1996 à 7 h 30 par ouverture de la vanne de fond, le passage du culot de vidange a été enregistré vers 17 heures soit un abaissement moyen de l'ordre de 25 cm/heure.

Les paramètres suivis durant cette vidange ont été les suivants :

- ammoniacque (NH₄);
- nitrites (NO₂);
- matières en suspension (MES) ;
- oxygène (O₂);
- acidité (pH).

Les paramètres O₂ et pH enregistrés en continu sur le site de la pisciculture située en aval du

barrage n'ont subi aucune incidence (O₂ minimum 7mg/l - pH 6,9).

Le paramètre MES relevé de manière discontinue a connu un pic de concentration au moment du passage du culot de vidange puis le lendemain de cette vidange en raison d'un premier événement pluvieux. Les enregistrements de ce paramètre ont été réalisés à l'aval immédiat du barrage et également au droit de la pisciculture. L'efficacité des seuils décanteurs a pu ainsi être démontrée, permettant un abattement des concentrations d'un coefficient 7. Le maximum enregistré à l'aval immédiat du barrage a été de 1 000 mg/l. Le maximum enregistré au droit de la pisciculture a été de 150 mg/l.

Pour les paramètres NH₄ et NO₂, relevés également de manière discontinue, les concentrations maximales ont été respectivement de 2,5 mg/l et 1 mg/l au moment du passage du culot. Ces concentrations non conformes aux objectifs de qualité 1B sont toutefois très satisfaisantes. Aucune mortalité n'a été enregistrée sur le cours d'eau ni à la pisciculture. La production d'eau potable n'a pas été perturbée.

LA PÊCHE DANS LA RETENUE

Les poissons présents dans la retenue (essentiellement des gardons) devaient être récupérés au moment de la vidange grâce à un dispositif de claies mis en place en aval du barrage. Organisée par le conseil supérieur de la Pêche, cette

pêche a été sans résultat. Aucune espèce piscicole n'a été piégée sur le dispositif. Ce résultat a été un indicateur de la qualité maintenue des eaux du Léguer. Il peut s'expliquer en effet par les hypothèses suivantes :

- absence d'anoxie, permettant ainsi la survie des espèces entre le barrage et le dispositif de pêche;
- remontée possible des espèces vers l'amont du bassin versant du fait de l'abaissement lent du niveau du barrage.

STABILITÉ ET PIÉGEAGE DES SÉDIMENTS

L'effet décanteur des seuils aval constaté durant la vidange a duré tout l'hiver 1996-1997. Maintenus jusqu'en octobre 1997, les seuils ont piégé environ 10 000 m³ de sédiments issus de la vidange et du rééquilibrage du profil en long de la rivière dans la retenue au cours de l'hiver.

Hors période de crue, la qualité des eaux du Léguer a été recouverte en aval du barrage dès le mois de décembre 1996. Le 1^{er} janvier 1997, nous avons pu constater la stabilisation du profil en long de la rivière dans l'ancienne retenue. Le substratum du cours d'eau a été intégralement découvert jusqu'en pied de barrage, les anciennes berges ayant également été mises à jour.

Phase 3 - Démolition du barrage

Le choix technique de maintenir un seuil au droit du barrage pour éviter toute érosion régressive massive a, par ailleurs, été conforté par l'étude préalable à la démolition de l'ouvrage. Ce seuil permettait en effet de maintenir en place les fondations de l'ouvrage représentant une partie importante dans l'estimation des volumes à démanteler.

Le métré a été réalisé d'après les plans d'origine, après que le conseil supérieur de la Pêche ait fixé la cote d'arase du barrage permettant ainsi la réalisation du seuil et de la passe à poissons dont la conception intègre les contraintes liées à la pratique du canoë-kayak. Le sous-sol de l'usine a été conservé pour partie comme élément du dispositif de franchissement.

Le métré des travaux à réaliser a été le suivant :

- produits de démolition 500 m³;
- recalibrage de la rivière et déblai de fondation des seuils 3 060 m³;
- volume de béton pour la passe à poissons 330 m³.

Vu le faible volume et le caractère inerte des produits de démolition, ceux-ci ont été stockés intégralement sous la partie de voûte conservée et dans l'ancien coursier d'évacuation de crue du barrage, réduisant d'autant le coût de l'opération.

La difficulté principale pour cette phase résidait dans la proximité de la période pluvieuse. Compte tenu de la faible capacité d'évacuation de la vanne de fond, toute mise en charge de l'ouvrage partiellement détruit devait être évitée.

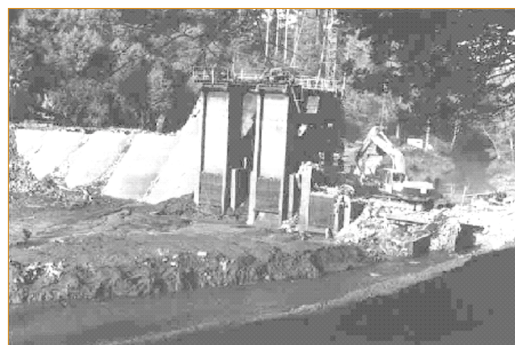
La technique retenue pour la démolition de l'ouvrage a été la pince à béton montée sur une pelle hydraulique à chenille. Cette démolition a été réalisée en quatre étapes.

Étape 1 : démolition de la voûte n° 5 (vanne de fond) puis démolition ou arasement des neuf voûtes de berges (photo 7).

Étape 2 : création des batardeaux amont et aval, arasement des six voûtes centrales abritant l'usine (photo 8) et construction des deux pré-barrages aval.



▲ Photo 7 – Démolition du barrage (Étape 1).



▲ Photo 8 – Démolition du barrage (Étape 2).

Étape 3 : aménagement du sous-sol de l'usine (3^e bassin de la passe à poissons).

Étape 4 : remodelage amont aval du lit, rétablissement des écoulements et suppression des batardeaux.

Les étapes 1 à 3 constituaient les phases les plus délicates vis-à-vis des risques de crues. Les conditions météorologiques relativement clémentes n'ont toutefois pas empêché la destruction du batardeau amont à deux reprises.

Entamée début octobre, la démolition a été relativement rapide (20 jours). On a pu noter la qualité très médiocre du béton des voûtes du barrage. Il présentait notamment d'importants nids de graviers. L'absence de coffrage extérieur à la construction des voûtes et la mise en œuvre manuelle expliquent sans doute cette médiocre qualité. Le ferrailage en fer doux était encore en relativement bon état et réalisé très soigneusement (recouvrement à 40 fois le diamètre, crosses en bout de barres et doubles ligatures).

L'enduit d'étanchéité existant sur le parement amont présentait des parties totalement soufflées, correspondant notamment aux voûtes dont le parement aval était en mauvais état.

Autres mesures annexes préalables ou parallèles à l'opération

Tout d'abord, la pisciculture située en aval a été équipée d'un système de veille en continu de la concentration en oxygène de l'eau. Des oxygénateurs supplémentaires ont été installés par mesure de précaution. Le pisciculteur n'a toutefois pas eu besoin d'utiliser ces équipements.

En second lieu, une convention a été passée avec le syndicat d'eau potable qui a dû surveiller de manière plus poussée la qualité de l'eau et accroître les traitements adaptés. Un équipement sur un ruisseau affluent du Léguer a été mis en place afin de permettre une petite dilution de l'eau prise dans la rivière.

Puis, un curage ponctuel à la pelle mécanique a dû être réalisé à l'amont immédiat du chantier d'aspirodragage, car les berges mises à nu se sont fortement déstabilisées par érosion régressive. 5 000 m³ ont été retirés.

Enfin, compte tenu de l'étiage très sévère de l'été 1996 et des risques induits vis-à-vis des enjeux aval du fait de la dégradation des conditions de dilution des rejets, nous avons dû lors des quinze

derniers jours d'aspirodragage (15 août - 1^{er} septembre) déplacer le rejet de la lagune jusqu'à l'aval des prises d'eau de la pisciculture et de l'usine d'alimentation en eau potable, soit plus de 500 m de canalisations équipées d'une pompe.

Travaux de finition

DÉMANTÈLEMENT DES SEUILS DÉCANTEURS

Les quatre seuils décanteurs maintenus jusqu'à l'étiage 1997 ont joué un rôle important dans la phase post vidange en terme de qualité d'eau même s'ils n'ont agi que sur la fraction la plus grossière des sédiments. Les trois premiers seuils contenaient en septembre 1997 un volume de sédiments important d'environ 10 000 m³.

Leur curage, réalisé parallèlement à leur démantèlement, a été effectué en 8 jours (fin octobre 1997) d'amont en aval au moyen de deux pelles hydrauliques. Les matériaux curés ont été réglés sur les sites des anciennes lagunes. Ce curage s'est effectué dans d'excellentes conditions sans incidence sur l'activité de la pisciculture et de l'unité AEP. Les matériaux piégés de septembre 1996 à octobre 1997 s'étaient consolidés naturellement, facilitant le travail à la pelle hydraulique.

REMISE EN ÉTAT DES LAGUNES DE STOCKAGE

La lagune aval, en raison du faible volume de vase stocké, a été refermée très rapidement après la vidange, par un terrassement au bulldozer.

La lagune de stockage amont a fait l'objet d'une analyse par le laboratoire de l'INSA de Rennes qui a permis d'évaluer l'évolution future des sédiments. Il en ressort que cette lagune recèle des épaisseurs importantes de vases et sédiments, loin d'être stabilisées, un an après la fin des travaux. La dessiccation apparaît très lente et les dépôts étaient encore localement recouverts par de l'eau résiduelle au milieu de l'été 1997.

Par ailleurs, le bassin présente une forte hétérogénéité dans la répartition des dépôts. Dans la partie amont, un sable propre contenant peu de matière organique (< 3 %) repose sur des vases organiques. Son épaisseur varie de 60 à 80 cm. La disposition du sable sur la vase s'explique aisément par le fonctionnement du bassin de décantation.

Dans la première phase de curage, le sable s'est déposé dans un périmètre restreint autour du point de rejet des boues. La hauteur d'eau étant très importante dans le bassin (plus de 2,5 m), la

décantation de la fraction fine argilo-limoneuse et de la fraction organique a pu se faire à une courte distance du point de rejet. Il en résulte que les vases sont parfaitement séparées du sable, et que les deux formations sont juxtaposées dans le bassin. Au fur et à mesure du remplissage du bassin, le point de rejet des boues a été progressivement déplacé vers l'aval. Le sable a alors recouvert les vases dans tout le périmètre proche du rejet. Les épaisseurs de sable sont maximales dans l'axe des rejets et diminuent sur les bords latéraux. À une certaine distance du point de rejet, on n'observe plus de sable et les sédiments présentent un aspect homogène de vase.

Un an après les travaux, vases et sables se différencient fondamentalement par leur teneur en eau. De moins de 20 % dans les sables, elle est comprise entre 100 et 200 % pour les vases. Les matériaux fins organiques de type vase ont une dessiccation très lente et qui prendra vraisemblablement plusieurs années. L'abaissement progressif de leur teneur en eau s'est fait dans un premier temps par évaporation puis aujourd'hui par le développement de la végétation qui a colonisé totalement le bassin. Les joncs, saules, typhas... qui ont une très forte densité et une hauteur souvent supérieure à 1 m contribuent à faire baisser progressivement mais lentement les teneurs en eau dans les horizons exploités par les racines.

Les actions menées pour favoriser la dessiccation des sédiments ont donc été :

- le rétablissement du ruisseau qui traverse le bassin en partie amont, équivalent à des ouvertures de brèches de drainage ;
- le creusement d'un fossé de drainage pour évacuer les eaux de ruissellement du côté droit du bassin ;
- l'abaissement de la crête de digue d'environ 2 m pour favoriser l'évacuation de l'eau ;
- le reboisement partiel.

Leçons de cette expérience

Abaissement lent du plan d'eau

L'un des principaux facteurs de la réussite de cette opération a été l'abaissement lent du plan d'eau. Sur une base de 3 cm/jour, cette diminution très lente de la colonne d'eau a permis d'éviter tous les phénomènes de sous-pression et de glisse-

ment qu'aurait engendrée une vidange classique sur ce type de sédiment très liquide.

Ce drainage naturel des sédiments laissés en place associé à la végétalisation des découverts a permis leur stabilisation rapide : 3 mois après leur mise hors d'eau, les terrains étaient praticables à pied.

La principale difficulté de l'opération a consisté à bien anticiper les variations du régime hydraulique du cours d'eau pour éviter de trop grandes fluctuations du niveau de la retenue, dont l'amplitude journalière maximale avait été fixée à 50 cm. Les caractéristiques hydrauliques du Léguer ainsi que les conditions météorologiques particulièrement clémentes d'avril à octobre 1996 ont été autant d'atouts favorables.

Le suivi en continu du niveau du plan d'eau a constitué une charge de travail très contraignante. La mise en œuvre d'un asservissement du niveau du plan d'eau (impossible dans le cas présent du fait de l'absence d'alimentation électrique du barrage) aurait très certainement permis d'alléger ce volet.

Gestion des lagunes

La principale difficulté a été de maintenir un rejet de lagune compatible avec les débits du Léguer afin de rester dans des gammes acceptables pour les principaux paramètres de qualité d'eau. En l'absence de toute référence, la gestion de ces lagunes n'a pu se faire qu'a posteriori, en utilisant l'analyse de la journée précédente pour fixer les conditions de rejet du jour même. S'il a été aisé de réduire les concentrations en MES en agissant directement sur le temps de séjour, le paramètre le plus délicat à gérer a bien été l'ammoniaque.

Du début à la fin du chantier, la concentration en ammoniaque des eaux en sortie de lagune n'a fait que progresser linéairement de 18 mg/l à plus de 30 mg/l sans que l'on puisse intervenir. Ces fortes concentrations et cette aggravation s'expliquent par la remobilisation et l'aération de sédiments chargés en matières organiques et par l'activité propre des lagunes. Seule une gestion du débit des rejets permettait d'améliorer la dilution dans la rivière.

Les faibles débits du Léguer associés à une augmentation continue de la charge en ammoniaque des eaux de rejet ont été les principaux paramètres limitants et ont nécessité dans un premier temps une diminution des temps de curage

puis finalement le déplacement du point de rejet en aval des enjeux les plus lourds (prise AEP, pisciculture).

De plus, si l'évaluation d'une charge en MES est, dans des conditions données, appréciable à l'œil par la turbidité, les concentrations en ammoniacque nécessitent des mesures et des appareillages *in situ*.

Gestion du curage

L'absence de données sur le positionnement du lit mineur initial au Léguer a constitué un écueil important dans la réalisation de ce chantier. L'ancien cadastre s'est révélé la seule base de données intéressante. Cette remarque a d'ailleurs été confirmée par la découverte, au fur et à mesure de l'avancement du chantier, des souches de la rypisylve d'origine.

L'analyse bathymétrique réalisée par canne de sondage n'a pas permis de localiser de manière fiable ce lit mineur, la discontinuité entre sédiments et berges originelles n'étant pas suffisamment marquée. A posteriori, plus la colonne d'eau était importante et plus la mesure présentait d'incertitude.

De fait, l'évaluation des sédiments à curer a été également sujette à incertitude. Ainsi, initialement basé sur un volume de 75 000 m³, le curage a finalement concerné plus de 94 000 m³.

Le curage en lui-même n'a généré quasiment aucune nuisance sur la retenue et la rivière en aval hormis le cône de remise en suspension des vases à proximité immédiate de la machine. Les différentiels de concentration entre l'amont et l'aval de la retenue ont été très faibles, tant pour les MES que pour NH₄ (figures 4 et 5).

La vidange finale

L'absence de dégradation forte de la qualité des eaux du Léguer lors de la vidange finale est soulignée notamment par l'absence de mortalité et la non dévalaison de la population piscicole de la retenue. Elle est la résultante directe du curage et de la reconstitution du lit initial du cours d'eau.

Le curage préalable des sédiments chargés en matière organique a permis d'éviter de fortes concentrations en ammoniacque et MES, facteurs ayant une incidence sur la qualité des eaux (tableau 1).

Suivi de la qualité de l'eau après la vidange

Très rapidement après la vidange, les eaux du Léguer ont retrouvé, hors crues, leurs caractéristiques initiales. Les quelques événements pluvieux ayant engendré des pointes de crues ont eu pour effet de découvrir intégralement le profil en long du Léguer entraînant les sédiments non hydrocurés encore présents dans le chenal. Quelques secteurs localisés ont également présenté des glissements de berges.

Les seuils décanteurs maintenus à l'aval de la retenue jusqu'en septembre 1997 ont permis de piéger l'essentiel de ces sédiments constitués surtout de sables grossiers.

Au 1^{er} janvier 1997, le profil en long du Léguer dans l'ancienne retenue était reconstitué, la stabilité des berges globalement acquise, aucun différentiel entre l'amont et l'aval de la retenue n'était plus perceptible pour les principaux paramètres de qualité d'eau.

Coût de l'opération – Financement

Le coût total de l'opération s'est élevé à 6 500 000 F dont 4 000 000 F pour la gestion des sédiments soit un coût unitaire de curage de 40 F/m³ (6 €/m³). Les tableaux ci-après détaillent les coûts des différentes opérations (tableaux 2 et 3 p. 26).

Conclusion

Plus que les travaux de génie civil qui ont été menés sans difficultés majeures et dans un délai assez court, la gestion des sédiments a été le problème le plus délicat posé par l'effacement du barrage de Kernansquillec.

Les contraintes fortes liées à l'encaissement de la vallée, à la présence en aval du barrage d'une prise d'eau pour l'eau potable et d'une importante pisciculture, ont pu être maîtrisées grâce à une solution technique qui a combiné :

| | Vidange 1988 | |
|---------------------|---------------------|------------|
| | au droit du barrage | |
| NH ₄ max | 18 mg/l | 3,5 mg/l |
| MES max | 14 682 mg/l | 1 300 mg/l |
| O ₂ mini | 0 mg/l | 7 mg/l |

◀ Tableau 1 – Comparaison des vidanges de 1988 et 1996 sur quelques paramètres.

| Objet | Montant |
|--|--|
| Études préalables (topographie, bathymétrie, protection AEP et pisciculture) | 103 000 F 15 700 € |
| Travaux préparatoires (évacuation transfo pyralène, démontage ascenseur à poissons, aménagement des accès) | 183 000 F 27 900 € |
| Équipement stations de mesure – Station de jaugeage et barrage | 120 000 F 18 300 € |
| Opérations piscicoles Pêche de sauvegarde, pêche de la retenue (Fédération hors coût CSP) | 53 000 F 8 100 € |
| Indemnisation amiable occupation temporaire de terrains – Incluant coût de remise à l'état initial | 200 000 F 30 500 € |
| Mesures compensatoires Prise en charge traitements complémentaires AEP Équipement oxygène surveillance pisciculture | 383 000 F 58 400 € |
| Travaux de curage – Incluant tous les travaux annexes : lagune, curage, lit rivière, curage méca- nique, aspirudragage | 3 945 000 F 601 400 € |
| Suivi qualité Léguer – De mai 1996 à janvier 1997 | 60 000 F 9 150 € |
| Travaux de démolition du barrage | 708 000 F 107 900 € |
| Travaux d'aménagement du seuil – Passe à poissons | 500 000 F 76 200 € |
| Étude d'aménagement du site après démolition | 245 000 F 37 350 € |
| Travaux de finitions | 222 000 F 33 850 € |
| COÛT TOTAL | 6 722 000 F 1 024 700 € |

▲ Tableau 2 – Coût des différentes opérations.

– le rétablissement de l'ancien lit de la rivière dans la retenue, par aspirudragage de la moitié des sédiments, mis à décanter dans des lagunes ;

– la consolidation des sédiments laissés en place grâce à une baisse très lente du niveau d'eau ;

– la construction de seuils dans la rivière en aval immédiat du barrage pour gérer la fin de la vidange.

La forte concentration en matières organiques des sédiments a généré d'importantes concentrations en ammoniacale sur les lagunes qu'il a fallu subir, ce qui a constitué la principale difficulté du chantier de curage.

Le chantier de réhabilitation du site du barrage de Kernansquillec est maintenant entré dans sa seconde phase : la mise en valeur du site. L'acquisition des terrains par les communautés de communes de Beg Ar C'hra et de Belle-Isle-en-Terre constitue le point de départ de ce nouveau chantier.

Associées dès le départ au projet de démantèlement du barrage par l'intermédiaire de l'Association de mise en valeur de la vallée du Léguer regroupant les principales communes, les collectivités mettent en œuvre, avec l'appui financier et technique de l'État, un programme de développement touristique autour de ce site et des friches industrielles existantes à l'amont immédiat : parcours pêche, randonnée VTT, accueil du public, site d'animation et d'exposition sur le passé industriel de la vallée. Ce programme représente une enveloppe d'environ 2 MF (0,3 M€).

□

| | |
|--|--------------------|
| Ministère de l'Industrie | 4 827 000 F |
| Agence de l'eau Loire Bretagne | 1 300 000 F |
| Ministère de l'Environnement | 350 000 F |
| Crédits européens et autres crédits État | 245 000 F |
| TOTAL | 6 722 000 F |

▲ Tableau 3 – Financement des opérations.

Résumé

Le barrage de Kernansquillec en Bretagne, vieux de 75 ans, a été démoli en 1996. C'était un barrage multi-voûtes de 15 m de hauteur et 400 000 m³ de capacité. Compte tenu de la vétusté de l'ouvrage, des risques induits pour l'aval et de l'absence de repreneur après la fin de concession, la décision de démolition a été prise par le préfet. Sa mise en œuvre a été délicate du fait de l'envasement de la retenue et des enjeux liés à la consommation d'eau en aval. La vidange a pu être menée à bien avec succès en combinant :

- l'hydrocurage de 90 000 m³ de sédiments de façon à restaurer l'ancien lit de la rivière ;
- la consolidation en place des sédiments restants par un abaissement très lent du plan d'eau ;
- la construction de quatre seuils en enrochements en aval du barrage pour la décantation des sédiments en fin de vidange.

Le coût total de l'opération fut d'un peu plus de 1 M€, dont 0,6 M€ pour le seul poste de gestion des sédiments.

Abstract

Kernansquillec dam in French Brittany has been demolished in 1996. It was a multiple arch dam, 75-year-old, 15 m high, with a reservoir capacity of 400 000 m³. Due to the poor condition of the dam, risks involved downstream, and lack of an operator after the end of the concession, the Prefet decided the dam demolition. Management of the sediments, representing 50% of the reservoir capacity was achieved without interrupting water intakes for domestic water supply and fishfarming, situated few hundred meters downstream from the dam. The solution combined:

- hydrodredging of 90 000 m³ of sediments to restore the old river bed in the reservoir ;
- *in situ* consolidation of the rest of the sediments, by slowly lowering the reservoir water level ;
- construction of four little rockfill weirs downstream from the dam, for water decantation at the end of emptying.

Total cost of the operation was just over 1 M€, including 0,6 M€ for sediment management.

Bibliographie

- PLET, D., 1999. Le barrage de Saint Etienne du Vigan a sauté. *Eaux libres*, n°26, avril 1999, p. 51-53.
- DULAC, B., LASSERRE, A., CORMIER, P., 1999. Adieu Maisons Rouges. *Eaux libres*, n°26, avril 1999, p. 55-59.
- DDE 37, 1999. *Effacement du barrage de Maisons Rouges*, Dossier photographique, 16 p.
- ROYET, P., 1997. Démolition du barrage de Kernansquillec et gestion des sédiments de la retenue. *XIX^e Congrès de la CIGB, Florence*, Q74-20, CIGB Paris, Vol. 5, p. 469-476.
- JIGOREL, A., DERVILLE, I., BONENFANT, M., LEPETIT, D., 1997. Démantèlement d'un barrage comblé par des sédiments fins détritiques et biogènes : impact sur le milieu. *Engineering Geology and the Environment*, Volume 3, p. 2733-2738, Marinos, Koukis, Tsiambaos & Stoumaras (eds). 1997 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 877 0, Symposium organisé par l'Association internationale de géologie de l'ingénieur, Athènes, Grèce, 1997.