

Marc CITEAU*
Vilma ZUMBO
Laboratoire régional des ponts
et chaussées d'Autun

Imperméabilisation par injection du barrage de Montaubry

■ RÉSUMÉ

La découverte d'une cavité de 1,5 m³ environ sous le talus aval d'un barrage en terre en cours de confortement a révélé la réalité d'un phénomène d'érosion interne qui était seulement soupçonné. Dans le cas du barrage de Montaubry, cette érosion interne s'est développée uniquement dans l'environnement des ouvrages hydrauliques. L'altération de la maçonnerie de ces ouvrages a offert à l'eau des points d'entrée et de sortie. Le cheminement de l'eau à l'origine de ce désordre empruntait un trajet assez complexe le long de l'extrados des ouvrages hydrauliques et le processus d'érosion était lent. Le radar géologique a permis une bonne localisation des zones à traiter et l'injection de coulis de ciment s'est imposée comme méthode de traitement rapide et maîtrisable. Le comblement des vides a été obtenu par injection gravitaire et l'injection sous pression a visé le colmatage des conduits d'écoulement. La zone traitée a été limitée à une bande de 9 m de largeur centrée sur le profil des ouvrages hydrauliques et 86 m³ de coulis ont été suffisants pour imperméabiliser la digue.

Injection sealing of the Montaubry Dam

■ ABSTRACT

The discovery of a cavity approximately 1.5 m³ in size underneath the downstream embankment of an earthen dam during structural reinforcement work has revealed the reality behind an internal erosion phenomenon that heretofore had only be suspected. In the case of the Montaubry Dam, this internal erosion had remained confined to the environment of the hydraulic structures. Alteration to the masonry of these structures has given rise to points of water ingress and egress. The water path responsible for this disorder followed a rather complex course along the extrados, or upper surface, of the hydraulic equipment and the erosion process had been progressing slowly. Geologic radar techniques have yielded an effective localization of the zones requiring treatment; cement slurry injection stood out as a quick-acting and easy-to-implement method. Void filling was accomplished by means of gravity injection, while pressurized injection was intended to plug the flow pipes. The treated zone was limited to a 9-m wide strip centered on the hydraulic works profile; moreover, 86 m³ of grout were sufficient to seal the embankment.

* AUTEUR À CONTACTER :

Marc CITEAU
marc.citeau@equipement.gouv.fr

L'OUVRAGE

Dans le département de la Saône-et-Loire (71), le barrage de Montaubry situé à l'est de la ville du Creusot sert à l'alimentation en eau du canal du Centre qui relie la Saône à la Loire. Le volume d'eau stockée à retenue pleine (5,1 millions de m³) ainsi que la forte sensibilité de l'environnement aval du barrage (présence d'une voie ferrée) ont justifié le classement du barrage parmi les ouvrages qui intéressent la sécurité publique.

Construit entre 1859 et 1861, le barrage est constitué d'une digue en terre de 16,60 m de hauteur hors sol et de 163 m de longueur en crête. Lors des terrassements préalables à sa construction, le

substratum a été mis à nu jusqu'à l'aplomb de la crête côté amont, tandis que, côté aval, le remblai de la digue a été édifié directement sur les sols en place constituant la couverture du *substratum* (figure 1). L'assise de la digue est de ce côté-ci constituée, soit de sols provenant de l'altération en place du gneiss (argile sableuse), soit, en fond de vallée, de dépôts alluvionnaires comportant essentiellement des sables grossiers peu argileux. L'épaisseur de cette couche en fond de vallée atteint 5,60 m et constitue un drain naturel assez efficace.

Les pentes des talus sont assez fortes (3/2) et la stabilité des talus vis-à-vis des risques de rupture, sans être surabondante, repose sur des conditions favorables d'écoulement au sein du massif. Le talus aval est simplement végétalisé. Le talus amont est protégé contre l'action des vagues et l'érosion par un perré maçonné.

Les ouvrages hydrauliques qui permettent la fourniture d'eau pour différents niveaux de remplissage de la retenue ont été placés sur un même profil : on trouve là deux tours de prise d'eau avec leurs chambres de vannes et leurs galeries associées, un puits central de récupération équipé d'une prise d'eau supérieure et une conduite d'évacuation (figures 2 et 3).

figure 1
Profil en travers
de la digue.

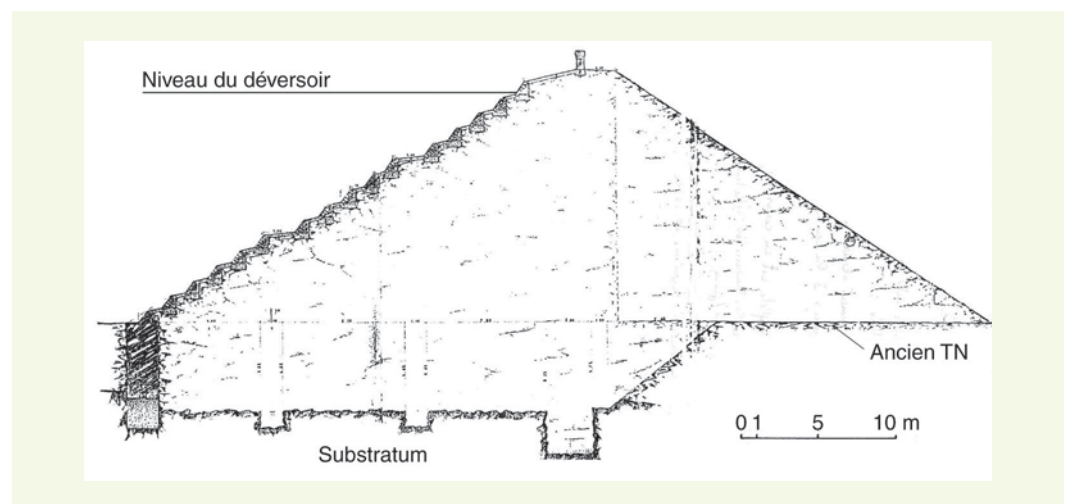


figure 2
Vue en plan du barrage
avec localisation des
ouvrages hydrauliques.

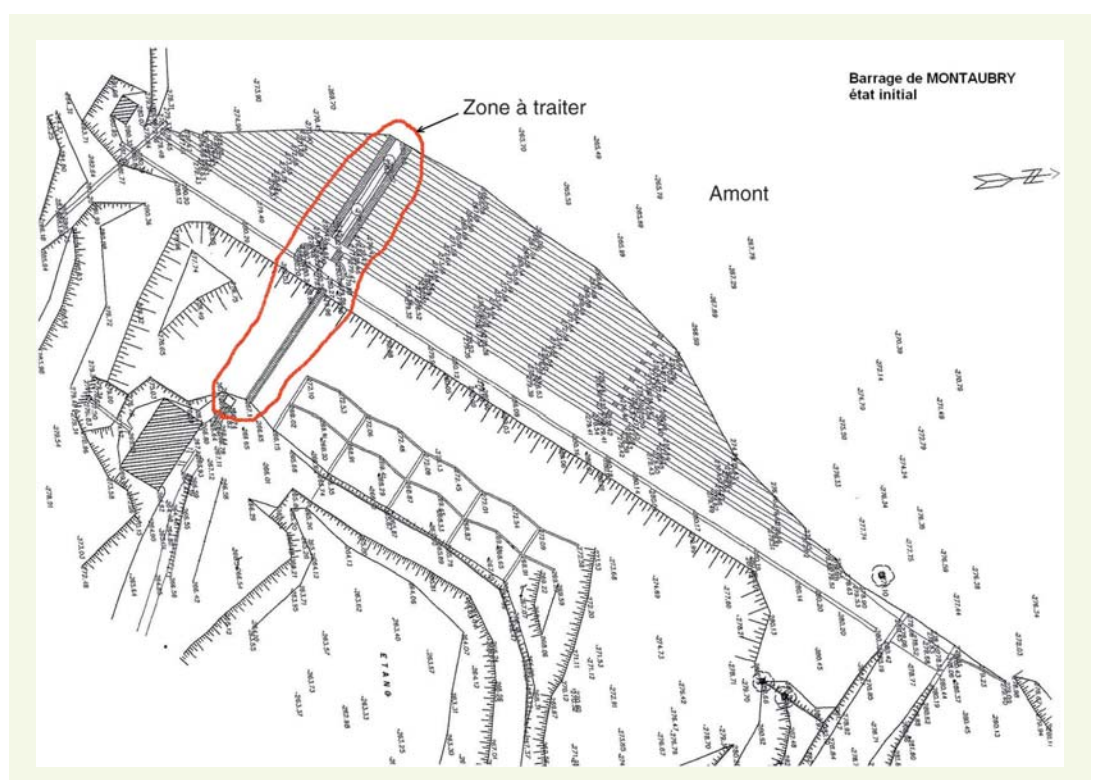
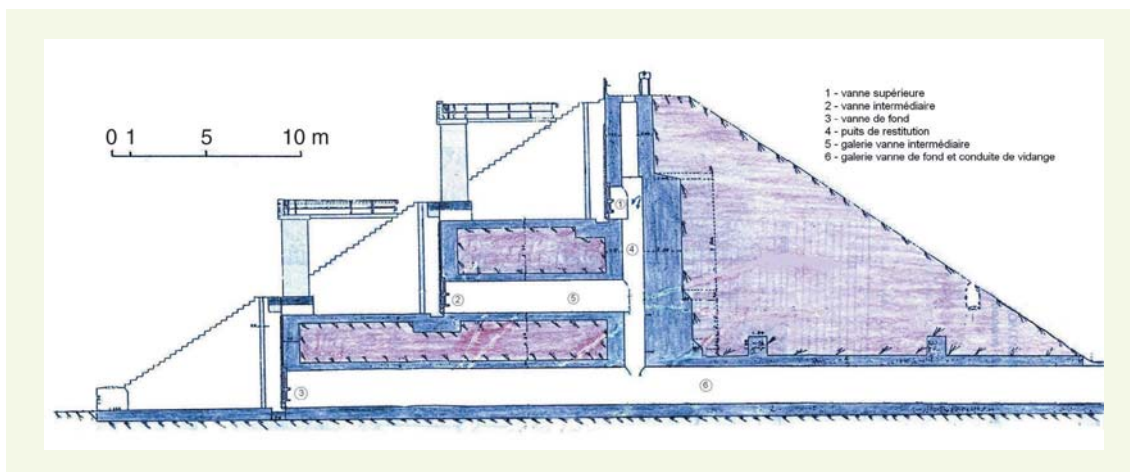


figure 3

Coupe de la digue au droit des ouvrages hydrauliques.



LES SIGNES ANNONCIATEURS DE L'ÉROSION INTERNE

L'ouvrage, géré par VNF (Voies navigables de France), connaissait une exploitation paisible depuis sa construction [1]. Si les archives relatent bien l'apparition de fuites à travers le rocher de fondation à retenue haute, celles-ci restent peu importantes (suintements) et se développent essentiellement au niveau des appuis de rive. Ces fuites existent toujours et constituent le seul incident recensé en un siècle d'exploitation.

Toutefois, les parties maçonnées du barrage présentaient dans les zones les plus exposées une altération de plus en plus marquée qui se manifestait par une dégradation progressive des joints pouvant aller jusqu'à la disparition complète du mortier. Le cœur des maçonneries est en assez bon état (un sondage carotté a permis de le vérifier) mais, en surface, les parties directement en contact avec l'eau subissent une usure progressive. L'altération des maçonneries est particulièrement marquée au niveau des bajoyers des chambres de vannes et du puits central (figures 4 et 5).

La dégradation des joints de maçonnerie facilite la pénétration de l'eau dans le corps de la digue. Dans la zone des ouvrages hydrauliques, cette eau trouve à l'interface entre maçonnerie et remblai une zone de perméabilité plus faible qui va canaliser son cheminement. L'eau peut ensuite ressortir, soit dans le puits central (zone de fuites), soit dans la voûte de la conduite d'évacuation, le débit de sortie étant d'autant plus fort que le cheminement est court : jets d'eau dans le puits et suintements le long de la voûte. Ces suintements, malgré leur faible débit, étaient continus et s'accompagnaient d'une action chimique au niveau des joints de maçonnerie.

figure 4

Disparition du mortier dans les joints de maçonnerie (escalier d'accès aux chambres de vannes).

figure 5

Disparition du mortier et érosion des pierres (zone de fuites dans le puits central).



45

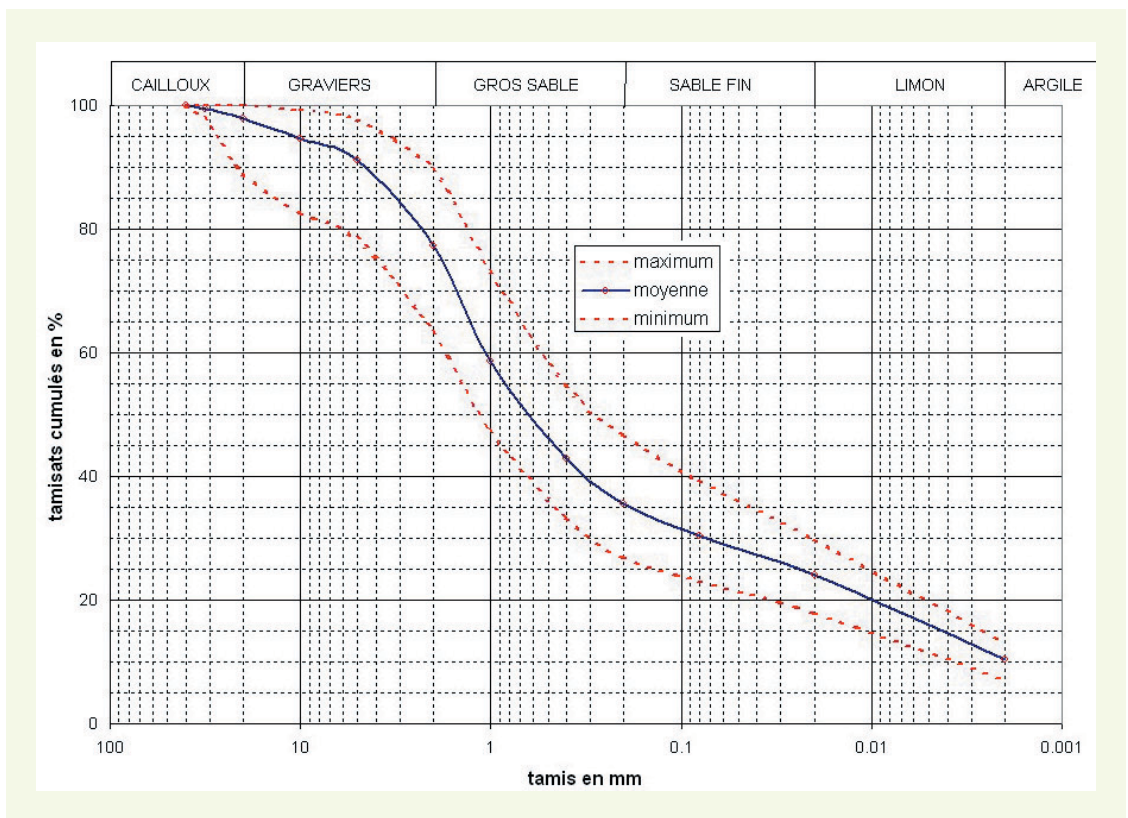


L'existence de ces circulations d'eau localisées à travers le corps de la digue était préoccupante. On pouvait craindre l'apparition et le développement de phénomènes d'érosion interne. L'attention s'est donc portée sur les matériaux utilisés pour construire la digue et sur leur aptitude à résister à l'érosion interne.

Les matériaux constituant la digue provenaient en grande partie des matériaux excavés du site. Le corps du remblai est assez homogène et constitué d'arènes granitiques, plus ou moins argileuses, généralement compactes. Le matériau présente une granulométrie étalée (figure 6) avec en moyenne 30 % d'éléments inférieurs à 80 µm et un pourcentage d'éléments fins ($\leq 2 \mu\text{m}$) compris entre 13 % et 7 %. C'est un sable fin silteux de classe B₅ et par endroits un limon peu plastique A₁ (au sens du GTR : Guide de terrassements routiers) [2].

La sensibilité au risque d'érosion interne analysée par la méthode de Lowe montre que la stabilité n'est pas assurée pour les sables fins ($d \leq 0,2 \text{ mm}$) : le remblai de la digue n'est pas auto-filtrant pour sa fraction fine. Le risque d'érosion interne était donc confirmé.

figure 6
Courbes
granulométriques
du matériau.



L'INCIDENT EN COURS DE TRAVAUX

Le barrage de Montaubry ne satisfaisait pas aux critères de sécurité actuels tant hydrauliques que géotechniques ; en effet, l'évacuateur de crues ne permettait pas d'absorber la crue décennale qui est le critère actuellement retenu pour dimensionner les barrages en terre, la capacité d'évacuation de la conduite de vidange était insuffisante et les conditions de stabilité de la digue n'étaient pas satisfaisantes (rupture de talus et érosion interne). La gestion de la ressource en eau s'en trouvait fortement pénalisée. La mise en conformité du barrage avait été décidée depuis quelques années et sa réalisation était planifiée pour 2001. Les travaux portaient sur :

- un rejointoiement soigné de toutes les parties maçonnées ;
- la construction d'une recharge drainée sur le talus aval (figure 7). L'augmentation de l'emprise de la digue permettait d'améliorer la stabilité de l'ouvrage et la mise en place d'un masque drainant

et filtrant, combinée à l'allongement du chemin d'écoulement, apportait une protection contre le risque d'érosion interne ;

- la construction d'un nouvel évacuateur de crues et l'augmentation des capacités de vidange.

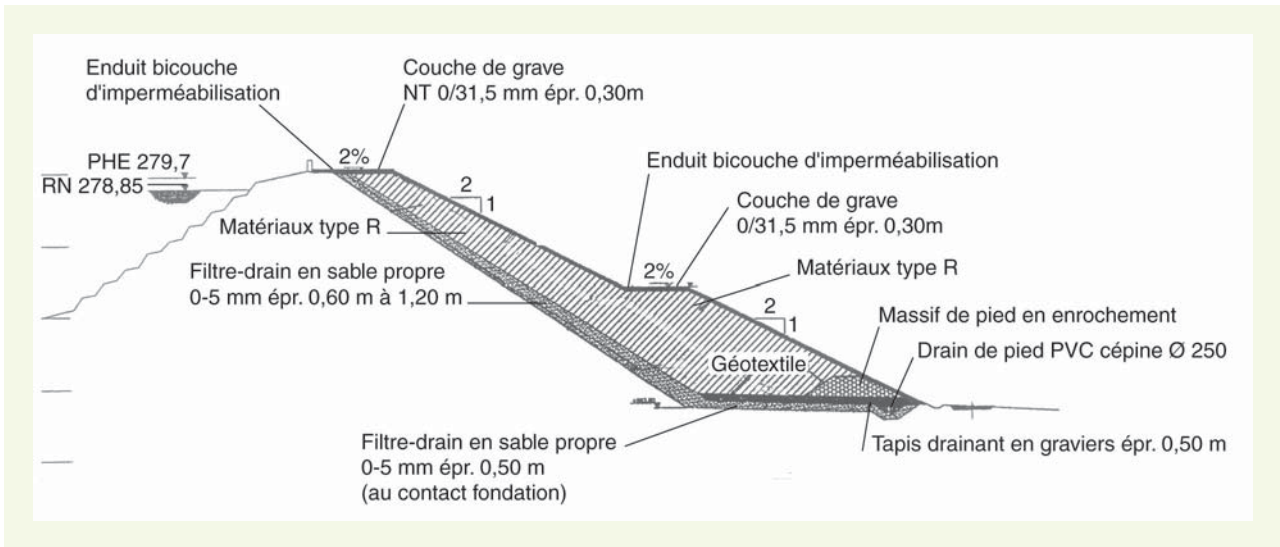


figure 7

Profil en travers type du confortement aval.

Deux mois avant le début des travaux, l'agent chargé de la surveillance découvre au cours de sa visite d'inspection quotidienne la présence d'un trou d'environ 40 cm de diamètre sur le talus aval. Ce trou révélait la présence d'une cavité en forme de voûte de 1,70 m de hauteur et de 1,50 m de diamètre à la base (**figure 8**). Aucun conduit d'écoulement naturel n'était visible sur les parois de la cavité et, en fond de cavité, l'épaisseur des sols meubles fraîchement écroulés apparaissait comme relativement faible.

Cette cavité se situait à l'aplomb de la galerie de vidange, à environ 5 m du pied du talus. Une visite d'inspection de la galerie, effectuée dans des conditions difficiles (la galerie n'était pas normalement accessible), a permis de s'assurer que l'ouvrage ne présentait pas de parties effondrées. La voûte apparaissait en bon état ; par contre, deux zones de fort suintement étaient détectées, la première se situant approximativement sous le fontis. En surface du talus aval, des compléments de reconnaissance (pénétromètre dynamique léger et reconnaissance géophysique) n'ont pas décelé d'autres zones décomprimées.

figure 8a

Découverte d'un trou en surface du talus aval.

L'hypothèse d'une érosion interne circonscrite à l'environnement des ouvrages hydrauliques apparaissait comme probable. Après aménagement des accès, une inspection visuelle des galeries, des

figure 8b

Vue du fontis.



8
a b

chambres de vannes et du puits central a été réalisée et complétée par une reconnaissance par radar géologique : il s'agissait d'évaluer la qualité du contact à l'extrados des maçonneries entre le remblai et l'ouvrage et de déterminer si la localisation de l'érosion aux abords immédiats des ouvrages pouvait être confirmée.

Une reconnaissance géophysique qui évite les forages et permet un zonage du terrain reconnu était nécessaire. Deux méthodes de reconnaissance électromagnétique ont été utilisées : en surface, une reconnaissance à l'EM31 (mesures électromagnétiques en basse fréquence) a été appliquée pour la reconnaissance des talus amont et aval. Cette méthode n'a pas fourni de résultat net et son efficacité semble limitée. Dans les galeries et dans le puits, la méthode, dite radar géologique, a permis de repérer des zones décomprimées ou des vides à l'arrière des maçonneries. Fondée sur l'interprétation d'un champ électromagnétique réfléchi par le sol [3], cette méthode permet de localiser assez précisément l'interface des couches de nature très différente (maçonnerie ou remblai) sous réserve que le terrain soit peu conducteur (peu humide et avec une faible proportion d'argile). Dans ce cas, lorsque l'enregistrement radar présente un écho particulièrement fort (figure 9), cette anomalie peut être interprétée comme signalant une hétérogénéité du terrain [4]. On a pu ainsi localiser plusieurs zones altérées, marquées par un fort écho radar. Celui-ci correspond, soit à des vides dans la maçonnerie (disparition du mortier des joints), soit à un défaut du terrain encaissant (défaut de contact ou zone décomprimée).

La reconnaissance radar a permis une meilleure évaluation du désordre lié à l'érosion interne : l'érosion interne apparaît plus liée au voisinage des ouvrages hydrauliques qu'à la seule nature des matériaux constituant le remblai, et elle affecte autant la maçonnerie des ouvrages que les remblais contigus. On a pu également constater que la dégradation des joints de maçonnerie était plus importante au droit des zones de raccordement des ouvrages hydrauliques (figure 10). L'action érosive de l'eau est nettement plus forte au droit de l'impact du jet et dans les tourbillons. La reconnaissance a aussi mis en évidence un grand nombre de défauts de contact entre maçonnerie et remblai, ainsi qu'une zone très altérée dans le perré du talus amont au voisinage de la tour de la vanne de vidange.

Par contre, dans la galerie de vidange, l'écho correspondant au fontis est isolé : l'élément qui avait déclenché l'alerte ne correspondait pas à la zone la plus dégradée. Le désordre apparu ici est peut-être lié à la disparition locale du joint de maçonnerie au niveau de la voûte de la galerie de vidange. Cet orifice dans la maçonnerie, à un endroit où elle est moins épaisse, permet une action érosive directe de l'eau, par soutirage, lors des rejets importants (turbulences). Une cavité a pu se créer et se développer à l'extrados de la voûte ; par éboulements successifs, cette cavité est ensuite remontée vers la surface.

figure 9

Exemple d'enregistrement radar après traitement.

Les anomalies d'écho correspondent à des terrains décomprimés ou à des vides.

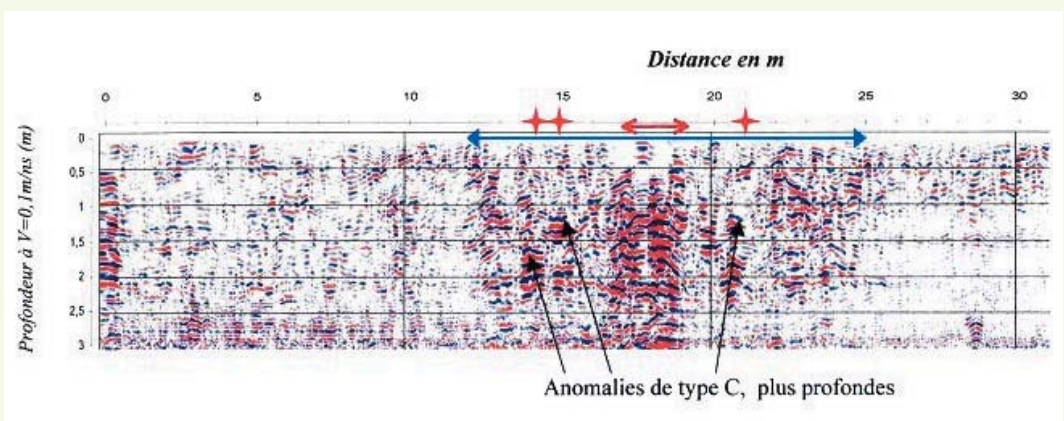
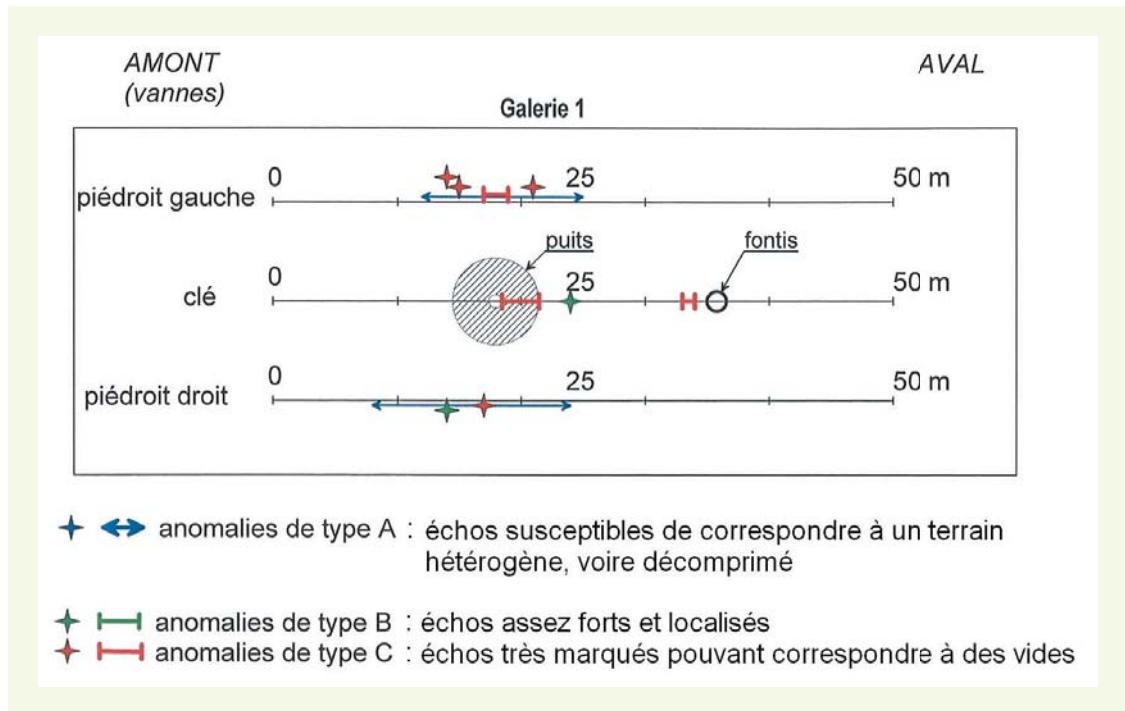


figure 10
Repérage des anomalies détectées dans la galerie de vidange.



L'IMPERMÉABILISATION DE LA DIGUE

Il apparaissait ainsi que le barrage présentait au droit du profil regroupant les ouvrages hydrauliques une zone de faiblesse particulière : dans cette zone, l'altération des maçonneries et l'érosion des sols avaient conduit à une perte sensible d'imperméabilité de la digue. Ce défaut de perméabilité était un nouveau sujet de préoccupation. Bien que lente, son évolution ne s'arrêterait pas et la découverte du fontis montrait la difficulté à anticiper le phénomène car les éléments fins du sol arrachés par l'érosion interne disparaissaient dans le conduit de vidange sans laisser de trace.

On remarque que, en l'absence d'apparition du désordre, le fontis aurait été enterré sous la recharge en cours de construction et son existence serait restée ignorée. Toutefois, le rejointoiement soigné de la maçonnerie, également prévu dans les travaux engagés, allait bloquer le soutirage des éléments fins du sol et une évolution dangereuse devenait moins probable. Néanmoins, laisser les choses en l'état ne constituait pas une option acceptable, une évolution non maîtrisable présentant toujours des risques. La réflexion conduite avec la participation du CETMEF (Centre d'études techniques maritimes et fluviales) et du BETCGB (Bureau d'étude technique et de contrôle des grands barrages) [5] a conclu que le traitement de l'étanchéité de la digue dans la zone du profil sensible constituait une priorité et qu'il était opportun de réaliser ce traitement en même temps que les travaux déjà engagés. L'objectif d'imperméabilisation a rapidement conduit à rechercher un moyen permettant d'introduire depuis la surface, dans le corps de la digue, un produit liquide durcissant avec le temps. Les techniques envisagées empruntaient aux techniques utilisées dans le domaine géotechnique [6] ou dans celui des ouvrages souterrains [7, 8].

Les procédés d'injection conçus dans un premier temps devaient permettre de combler les vides et de créer autour des conduites de prise d'eau et d'évacuation un pseudo-écran anti-renard. La maîtrise d'œuvre privilégiait l'injection solide : ce procédé a pour objectif de resserrer le sol, sans le fracturer, en injectant un mortier. Cette technique ne vise pas à imperméabiliser le terrain ; de ce fait, les conduits d'écoulement seraient restés présents et le contournement des zones injectées n'était pas exclu. Le moyen finalement retenu a été le traitement systématique et très soigné de l'étanchéité des ouvrages traversant (rejointoiement du puits et des galeries) complété par deux phases d'injection.

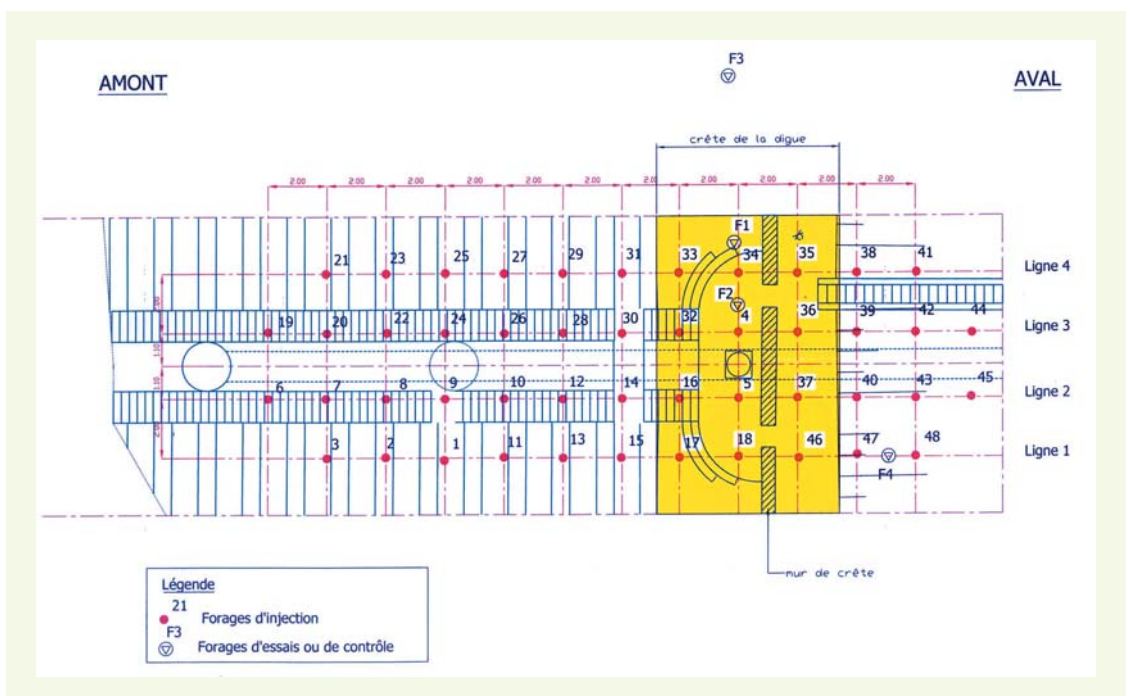
L'injection qui consiste à faire pénétrer dans le sol un coulis fluide est apparue comme le moyen de traitement le plus adapté. Toutefois, la différence de nature des volumes à traiter (maçonnerie ou sol) et la variété des objectifs (comblement de vides, étanchement et reconsolidation) ont rendu difficile le choix d'une méthode d'exécution. Rappelons en effet que :

- la régénération des maçonneries par remplissage de vides relativement importants est obtenue au moyen d'une injection de fissure sans déplacement des terrains. Elle vise à réduire la perméabilité et à accroître la résistance de la masse traitée. Elle se fait en une seule passe d'injection et utilise des coulis de ciment stabilisés moyennement fluides. Ces coulis doivent avoir une résistance mécanique suffisante pour reconstituer une véritable liaison entre les pierres et leur décantation doit être faible ;
- l'injection derrière les maçonneries pour combler des vides centimétriques entre maçonnerie et terrain encaissant (injection de contact ou de « collage ») vise aussi à réduire la perméabilité. Le déplacement des terrains doit être évité à cause des risques pour la maçonnerie. L'injection se fait en une passe et on utilise ici des coulis peu fluides. La stabilité et la résistance ne sont pas des paramètres déterminants ;
- pour le traitement de terrain, on cherche, comme dans le cas présent, à colmater en priorité les conduits d'écoulement et accessoirement à reconsolider les sols décomprimés. L'injection solide, après claquage local le cas échéant, permet de traiter des volumes significatifs de sol. Elle s'accompagne de déplacement des terrains. Cette opération nécessite des coulis très fluides, avec des pressions d'injection élevées, et l'injection doit être faite par horizons successifs.

■ La méthode mise en œuvre

La procédure utilisée a consisté à quadriller la zone à traiter par 48 forages d'injection verticaux, exécutés depuis la surface et espacés de 2 m suivant une maille carrée. Ils ont été répartis le long de quatre lignes encadrant les chambres de vannes, les galeries de vidange et le puits (figure 11). Selon leur emplacement, les forages ont traversé, soit le remblai de la digue, soit la maçonnerie des chambres de vannes ou celle du puits. Dans le remblai, l'outil de forage était un tricône monté sur des mèches mais, pour l'amorce du forage sur le parement maçonné, il a fallu utiliser un carottier pour ne pas désorganiser le parement. Les forages au tricône ont été réalisés à l'air. Onze forages ont été poursuivis sur 0,5 m à 3 m dans le *substratum*.

figure 11
Plan d'implantation
des forages
d'injection.



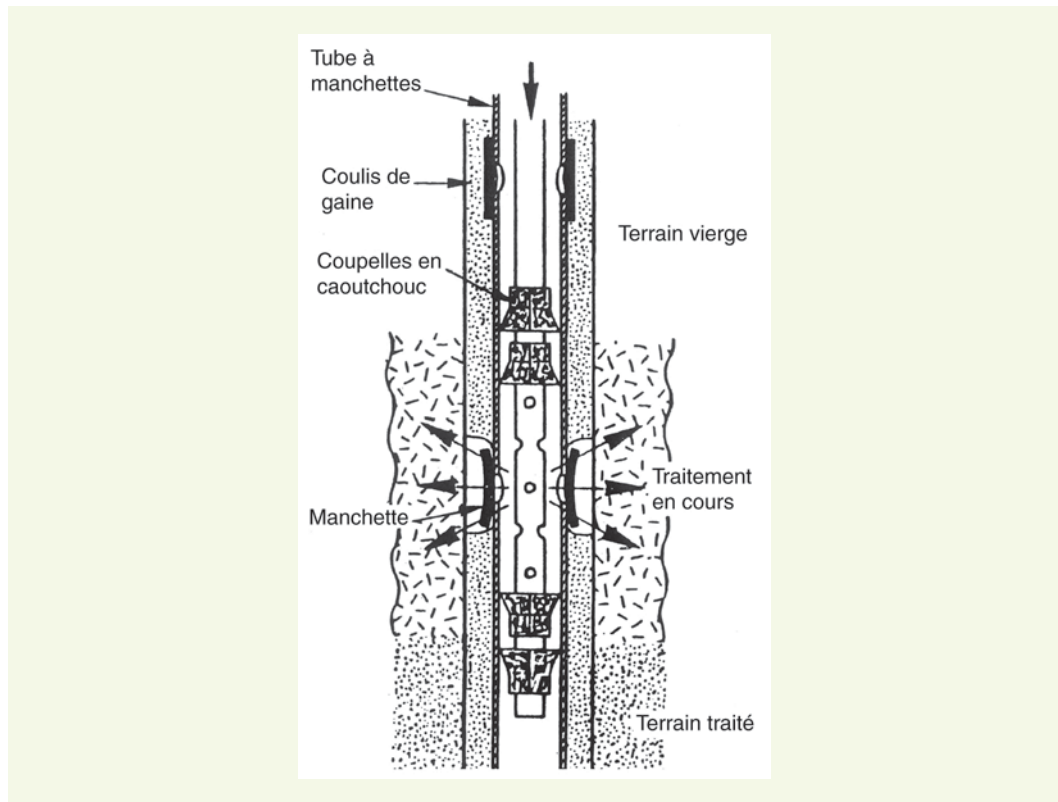
L'injection a comporté deux phases.

La première phase, réalisée après chaque série de 2 ou 3 forages, consistait en un remplissage par gravité des forages au moyen d'un premier coulis (coulis de gaine). Les forages n'étaient pas tubés et il s'agissait ici de remplir le plus possible les vides centimétriques (ou plus) présents dans les maçonneries (joints disparus) ou dans le terrain (cavités). Ce remplissage était suivi par la mise en place d'un tube à manchettes et complété le lendemain pour compenser les volumes de coulis absorbés par la maçonnerie ou le terrain ; ce coulis de gaine avait aussi une deuxième fonction : en remplissant l'espace annulaire entre le tube à manchettes et le terrain, il constituait, après un début de prise, un bouchon qui empêchait le coulis d'injection sous pression de remonter vers la surface le long du forage.

La deuxième phase correspondait à l'injection sous pression. Elle est réalisée généralement 24 heures après la fin du remplissage, à différentes profondeurs au moyen de tubes à manchettes, en commençant par le fond (figure 12). L'objectif visé ici est de claquer le coulis de gaine au droit des orifices d'injection afin de pousser un coulis fluide dans les conduits d'écoulement creusés par l'eau (on a pu observer au cours de cette phase des communications entre forages).

figure 12

Principe de l'injection au moyen du tube à manchettes (extrait des Recommandations de l'AFTES [7]).



■ Les paramètres d'injection

La définition des paramètres d'injection (pressions, volumes) s'est appuyée sur quelques données géotechniques supplémentaires.

La perméabilité des terrains en présence, hors zone dégradée, est relativement faible :

- $5,7.10^{-8} \text{ m/s} < k_L < 8,8.10^{-6} \text{ m/s}$ (essais Lefranc) pour les sols constituant le corps de la digue ;
- 2 UL à 45 UL (unité Lugeon) dans la fondation rocheuse fissurée. Toutefois, dans les zones très fracturées, cette perméabilité pouvait atteindre 70 UL. Le réseau de fissures du toit rocheux pouvait être à l'origine de fuites localisées (le décolmatage des fissures s'observait à partir de 0,3 MPa) ;

– dans les maçonneries, les parties saines peuvent être considérées comme parfaitement étanches. Par contre, la perméabilité des zones dégradées est vraisemblablement très grande (joints ouverts de l'ordre du cm).

Les pressions d'injection maximales ont été déterminées par la mesure de la compacité des sols. On est en présence d'un remblai assez homogène et moyennement compact ($0,84 < p_L^* < 1,41$ MPa). Compte tenu de la pression d'ouverture des manchettes (0,3 MPa), la pression d'injection (après claquage du coulis de gaine) a été définie à 0,8 MPa avec un maximum à 1 MPa.

Les coulis utilisés sont des mélanges eau-ciment faiblement dosés. Ils présentent un rapport pondéral C/E (ciment sur eau) égal à 1,5 pour le coulis de gaine et à 1,15 pour le coulis d'injection sous pression. On a utilisé un ciment CPJ 32,5 (dénommé aujourd'hui CEM II) et les coulis ont été préparés avec 3 % de bentonite afin d'améliorer leur stabilité.

Les caractéristiques obtenues sont données dans le **tableau 1**. Bien que très fluide, le coulis a présenté des caractéristiques mécaniques satisfaisantes.

tableau 1
Caractéristiques
des coulis.

	Coulis de gaine	Coulis d'injection
Densité	1,67	1,63
Cône de Marsh (diamètre 12 mm)	9 s	8 s
Résistance à la compression	18 à 23 MPa	18 MPa

■ Les résultats

L'une des difficultés de ce chantier a été l'adaptation aux conditions d'accès particulièrement difficiles (**figure 13**). Deux ateliers de forage mettant en œuvre des matériels d'encombrement réduit ont été installés. La centrale de fabrication du coulis était implantée en rive gauche à environ 100 m des points d'injection.

Le contrôle des paramètres d'injection a été effectué au moyen d'une centrale d'acquisition qui enregistrait en continu le volume, le débit et la pression. La centrale était connectée à un traceur graphique qui imprimait au fur et à mesure les graphiques correspondants (**figure 14**). La centrale permettait aussi la gestion automatique de l'injection en fixant les seuils de volume ou de pression à ne pas dépasser. Cette disposition a rapidement été remplacée par le contrôle direct de l'opérateur (fiabilité de la saisie par temps de gel).

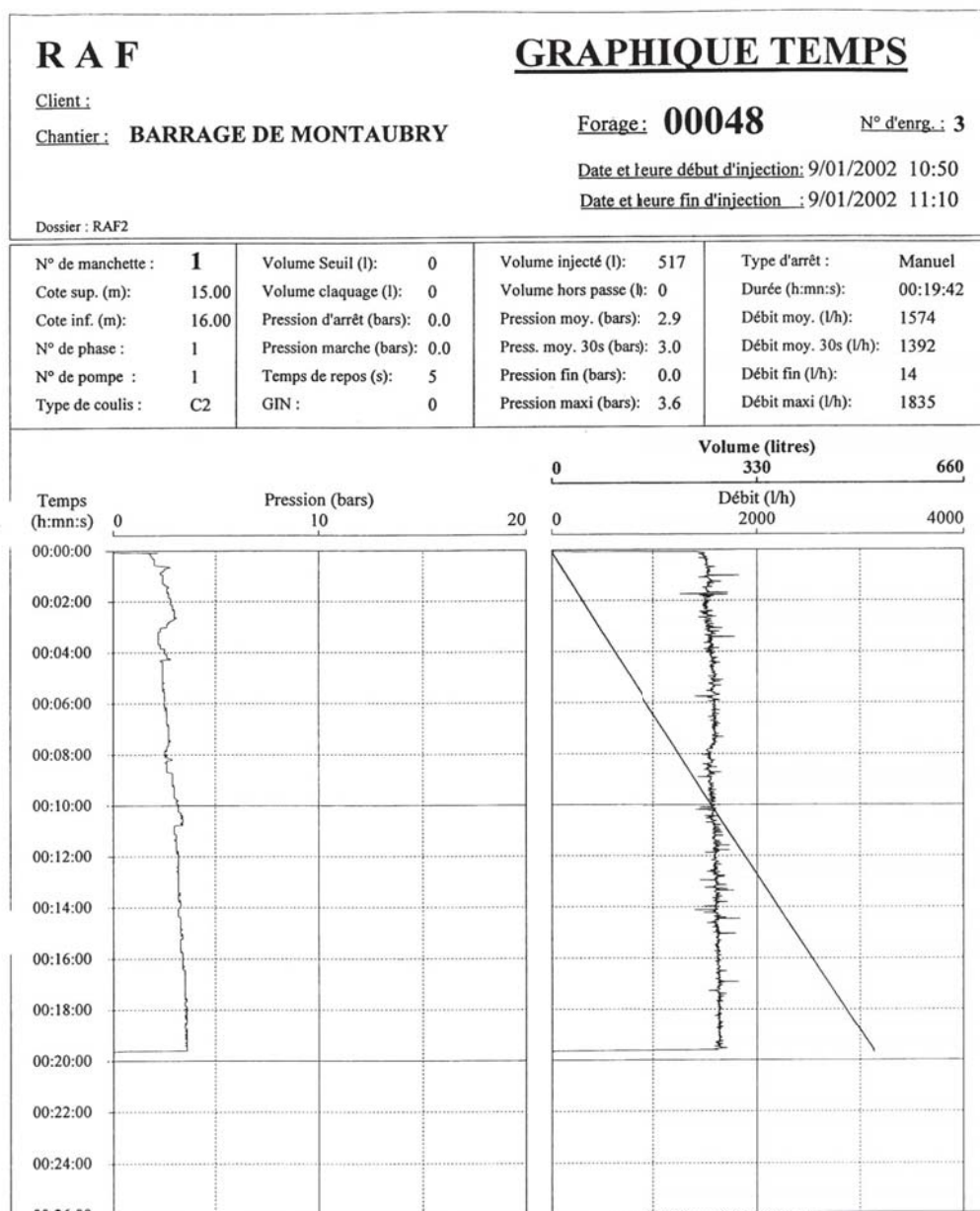
Les seuils suivants ont été retenus pour chaque passe d'injection :

- pour le volume : 300 litres, puis 500 litres ;
- pour la pression : 0,8 MPa, puis 1 MPa.

figure 13
Forage avant mise en place
du tube d'injection.



figure 14
Enregistrement
des paramètres
d'injection.

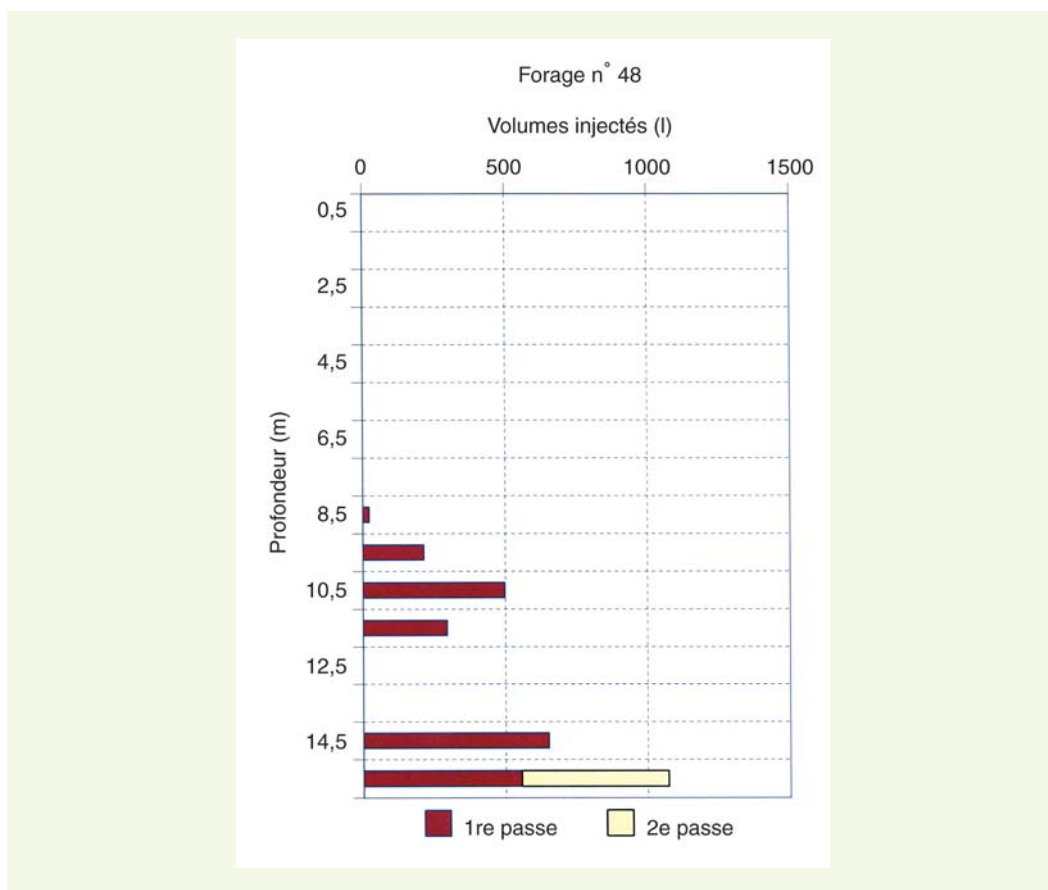


Toutefois, l'ouverture des manchettes a souvent nécessité l'application de pressions nettement plus fortes, de 2 à 5 MPa.

Afin de détecter le plus tôt possible l'apparition d'éventuelles déformations dans la structure, un dispositif de surveillance avait été mis en place. Il a consisté en un suivi topographique manuel de six points scellés sur les maçonneries. Ce suivi a été complété par des mesures d'écartement des murs des chambres de vannes. Le suivi topographique n'a signalé aucun mouvement détectable. Par contre, les murs des chambres de vannes ont subi une légère déformation lors des premières injections (1 à 10 mm). Ils ont alors été butonnés. L'essentiel de la surveillance a toutefois reposé sur l'inspection visuelle simultanée, durant chaque phase d'injection sous pression, des talus, des parements maçonnés et des galeries dans lesquelles des événements avaient été mis en place (ceux-ci devaient permettre au coulis de ressortir).

On a schématisé sur la [figure 15](#) les quantités de coulis injectées sous pression au droit d'un forage, au niveau de chaque manchette (la manchette située à 15,50 m a fait l'objet d'une reprise d'injection). En tout, 86 m³ de coulis ont été injectés, ce qui représente moins de 5 % du volume traité. On constate que la répartition du coulis a été très inégale. En effet :

figure 15
Répartition des volumes
injectés.



– le remplissage gravitaire (coulis de gaine) n’a consommé que 15,5 m³. Les forages exécutés sur le talus amont (escaliers et risbermes) ont absorbé 4 à 5 fois leurs volumes vides (lors des forages, deux passages décimétriques de vide avaient été recoupés ; huit passages de maçonnerie dégradée dans le puits ainsi que quelques niveaux de remblai décomprimé avaient été enregistrés). Il semble que le coulis ait ici bien comblé les vides de la maçonnerie et les défauts de contact entre maçonnerie et remblai ;

– le coulis d’injection sous pression représente 70,5 m³, mais ici aussi la répartition est inégale puisque 69 % du volume a été injecté principalement dans le remblai rencontré sous la crête de la digue et sous le talus aval (**figure 16**). On note que la zone correspondant à la fuite dans le puits est celle qui a absorbé le plus de coulis (environ 300 litres par ml de forage).

Plusieurs résurgences de coulis ont été notées lors des injections (**figure 17**), ce qui confirme la communication entre les différents vides rencontrés. Les distances parcourues entre le point d’injection et le point de résurgence varient entre 3 et 7 m. Les points de résurgence ont alors été colmatés au ciment prompt et l’injection a été reprise. Le repérage des forages associés aux résurgences montre que de nombreux conduits d’écoulement existaient sous le talus amont à droite des chambres de vanne, ce qui corrobore assez bien les mesures radar effectuées. Au droit du puits, 4 forages d’injection sur 12 ont donné lieu à des résurgences et, sous le talus aval, l’axe de la galerie de vidange est marqué par des sols décomprimés ou délavés (forte absorption de coulis) avec des vides communicants (l’un des forages d’injection a trouvé et suivi un conduit d’écoulement débouchant dans la galerie de vidange).

BILAN DU TRAITEMENT PAR INJECTION

Les volumes de coulis consommé ont été très inférieurs aux prévisions. Cela tient au fait que l’extension des zones très dégradées était limitée. Par contre, les quantités de coulis absorbées par

figure 16
Volumes de coulis injectés par forage.

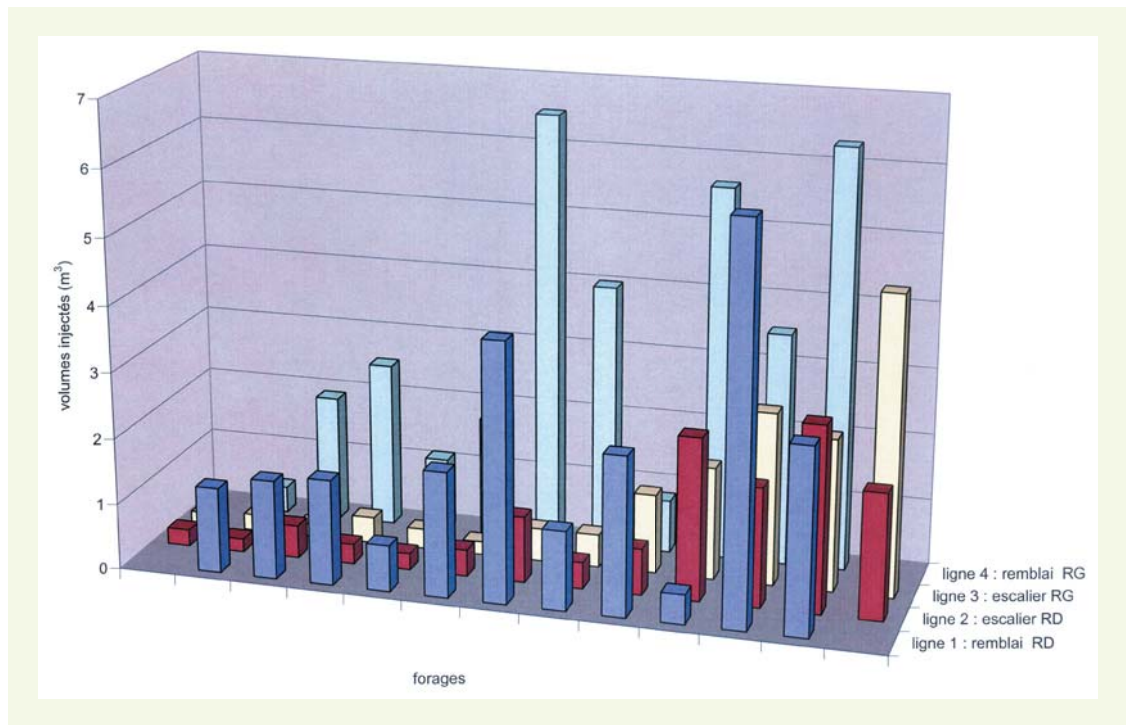


figure 17
Résurgences de coulis sur le talus amont.



certains forages ont confirmé l'existence de zones ponctuelles déjà fortement érodées ; l'urgence du traitement était donc parfaitement justifiée.

Le rejointoiement soigné des joints de maçonnerie en parement avait naturellement précédé le traitement par injection. Dans le conduit d'évacuation, un écoulement à fort débit en communication avec le remblai a disparu. Le forage de contrôle destiné à observer la capacité d'absorption du remblai a montré que celle-ci avait été divisée par cinq : l'injection secondaire n'a peut-être pas recomprimé les sols ; par contre, elle les a étanchés. Enfin, quatre mois après la première phase de remise en eau, une inspection du puits faite par le LRPC d'Autun a permis de constater l'arrêt des fuites antérieures.

L'objectif d'imperméabilisation de la digue dans la zone traitée semble avoir été atteint. Un contrôle supplémentaire de l'efficacité du traitement pourra néanmoins être effectué en réalisant des mesures de perméabilité, voire des essais pressiométriques, dans le remblai.

CONCLUSIONS

L'incident apparu a montré que la présence d'ouvrages hydrauliques traversant constituait un point sensible des barrages en terre. Du point de vue des perméabilités, l'interface entre remblai et

maçonnerie est un point faible qui offre souvent à l'eau une zone de passage privilégiée. En outre, la dégradation des joints de maçonnerie favorise les pénétrations à l'amont et crée des exutoires à l'aval. On a pu ainsi constater que le pouvoir érosif de l'eau est fort tout le long des conduits de prise d'eau ou d'évacuation, y compris près de l'extrémité aval, et que chaque trou dans la maçonnerie constitue une amorce d'érosion régressive.

L'impossibilité d'observer des dépôts d'éléments fins, lorsque l'exutoire des circulations d'eau se situe dans une conduite d'évacuation, montre les limites de l'inspection visuelle (pourtant indispensable). La reconnaissance des galeries par radar géologique est apparue comme un moyen efficace de détection des vides ; une nouvelle reconnaissance par radar géologique est prévue à titre de contrôle. Ce type de reconnaissance pourrait être utilement intégré aux reconnaissances géotechniques réalisées lors des diagnostics de barrages en terre anciens.

Le comblement des cavités et des conduits d'écoulement par injection de coulis de ciment en deux phases, gravitaire puis par tubes à manchettes, a donné ici des résultats satisfaisants ; la technique à mettre en œuvre est toutefois à adapter à chaque cas particulier.

La souplesse de mise en œuvre de l'injection a ici permis de faire face à un imprévu très sérieux et de réaliser un traitement d'imperméabilisation en deux mois sans perturbation excessive des travaux de confortement en cours. Néanmoins, l'absence de délais est toujours pénalisante pour la préparation, l'organisation et le suivi d'un tel chantier.

Le dispositif de surveillance du talus aval a été refait : des capteurs de pression interstitielle ont été insérés dans la recharge en cours d'édification, et, un réseau de drains, en pied de digue, permet la collecte et la mesure des débits de fuite (figure 18). Le coût du traitement par injection a été de 112 500 €, ce qui a représenté 10,5 % du montant initial du marché de travaux [9].

figure 18
Vue du talus aval
après travaux.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Archives VNF, subdivision de Montceau-les-Mines (71).
- 2 LRPC Autun-Barrage de Montaubry, étude de confortement (février 1993).
- 3 LAGABRIELLE R., Géophysique appliquée au génie civil, *Techniques de l'Ingénieur*, C224.
- 4 Société GEORADAR SERVICES, reconnaissance géophysique du Barrage de Montaubry, juin 2001.
- 5 BETCGB – Barrage de Montaubry, avis sur les actions à mettre en place, février 2001.
- 6 Norme française NF EN 12715, P 94-330, octobre 2000, exécution des travaux d'injection.
- 7 TOS n° 89, sept.-oct. 1988 – Recommandations de l'Association Française des Travaux en Souterrains (AFTES), pp. 31-78, Travaux d'injection pour ouvrages souterrains.
- 8 TOS n° 146, mars-avril 1998, L'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables, pp. 103-134.
- 9 LRPC Autun - Barrage de Montaubry, rapport de remise en eau, juillet 2003.