

Guide
pratique

La surveillance et l'entretien des petits barrages

Paul Royet



 **Cemagref**

La surveillance et l'entretien des petits barrages

Paul Royet



ISBN Cemagref 2-85362-662-8
© Cemagref, 2006
Parc de Tourvoie BP 44 – 92163 Antony Cedex

Avant-propos

Le présent document traite de la surveillance (inspection visuelle et auscultation) et de l'entretien des petits et moyens barrages en France, soit, pour fixer les idées, des barrages de moins de 20 m de hauteur par rapport au terrain naturel.

Ce guide est destiné prioritairement aux propriétaires et exploitants de ces petits et moyens barrages, qu'il s'agisse de collectivités territoriales, d'associations syndicales autorisées d'agriculteurs, ou de propriétaires privés. Il peut également être consulté utilement par l'ensemble des ingénieurs et techniciens intervenant sur ce type d'ouvrage, dans le cadre de missions de contrôle de l'État ou bien dans le cadre de missions d'ingénierie ou d'expertise.

Après avoir développé le contexte et les objectifs du suivi des ouvrages, ce document traite des modalités de l'inspection et de l'auscultation des barrages de petite et moyenne dimensions, de tous types, récents ou anciens. Figurent également les recommandations pour l'entretien courant (ou petite maintenance) de ces barrages. Des fiches pratiques sont fournies pour les relevés de mesures et les visites techniques.

Une première édition de ce guide avait été rédigée en 1994 par P. ROYET et avait bénéficié de la relecture et des remarques de :

- A. GOUBET, ministère de l'Industrie, président du CTPB
- N. GODARD, ministère de l'Environnement
- P. LE DELLIOU, BETCGB Grenoble
- G. DEGOUTTE, Engref Paris
- D. LAUTRIN, E. ALONSO, P. MÉRIAUX, Cemagref
- P. MONADIER, STCPMVN Compiègne.

Cette deuxième édition a été revue par P. ROYET avec la collaboration de N. MONIÉ (ministère de l'Écologie), de G. DEGOUTTE (CGGREF), de P. MÉRIAUX et L. PEYRAS (Cemagref). Elle intègre les évolutions récentes des techniques et des pratiques professionnelles du domaine.

Les deux éditions ont bénéficié d'un financement du ministère en charge de l'environnement (Direction de l'eau).

Sommaire

Avant-propos	3
Nécessité et objectifs de la surveillance des barrages	9
Responsabilité du propriétaire	9
La réglementation spécifique aux barrages	10
La conservation de l'ouvrage en bon état de service	10
Domaine d'application du guide	11
Rôle des intervenants	13
Le propriétaire	13
Le maître d'œuvre pour la construction	14
L'exploitant	14
L'ingénieur ou le bureau d'études chargé de l'auscultation et du suivi	15
Le service du contrôle	16
La surveillance des petits barrages	17
Principes généraux de la surveillance	17
L'inspection visuelle	18
L'inspection visuelle de routine	18
L'inspection visuelle à l'occasion des crues	20
L'inspection après les séismes	21
Les visites techniques approfondies	21
Le registre du barrage ou « registre de l'exploitant »	22

L'auscultation des petits barrages	25
Les appareils d'auscultation des petits barrages	25
Mesure de la cote du plan d'eau	26
Mesure des débits	26
Mesure de la piézométrie	28
Mesure des déplacements	31
Mesures de déformation	34
Repérage des instruments d'auscultation	35
Dispositif d'auscultation selon les types de barrages	36
Le dispositif d'auscultation des petits barrages en terre	36
Le dispositif d'auscultation des petits barrages à masque amont	39
Le dispositif d'auscultation des petits barrages poids en maçonnerie ou en béton	41
Le dispositif d'auscultation des petits barrages voûte en béton	43
Périodicité des mesures d'auscultation	45
Interprétation des mesures d'auscultation	47
La vérification de la mesure	47
L'analyse des mesures	47
L'analyse de quelques phénomènes irréversibles	48
Périodicité de l'analyse des mesures	49
Entretien des petits barrages	51
Contrôle de la végétation	51
La végétation arborée et arbustive	51
La végétation herbacée	52
Entretien de surface des maçonneries	53
Comblement des ravines sur le talus d'un barrage en remblai	53
Prévention et traitement des dégâts des animaux fouisseurs	54

Réparations des désordres dus au batillage sur le talus amont	55
Réparation des fils rompus de gabions	56
Entretien du dispositif d'auscultation	57
Entretien des ouvrages hydrauliques	57
Évacuateur(s) de crues	58
Prise(s) d'eau et vidange	59
Annexe I – Fiches de visite approfondie des petits barrages	61
Commentaires des fiches de visite	67
Annexe II – Analyse statistique des mesures	77
Pour en savoir plus	79

Nécessité et objectifs de la surveillance des barrages

Responsabilité du propriétaire

Les propriétaires ont le droit de construire un barrage de retenue sur leur propriété ou sur les cours d'eau non domaniaux dont ils sont riverains, à condition qu'ils respectent la réglementation en vigueur.

En contrepartie, l'exercice de ce droit engage la responsabilité du propriétaire envers les tiers, s'ils subissent des dommages consécutifs à la construction de l'ouvrage.

Le propriétaire, en application de dispositions du code civil, est responsable au premier chef de la bonne tenue de son ouvrage. Sa responsabilité civile peut être engagée en cas de dommages à un tiers, pour faute... :

Art. 1382 — *Tout fait quelconque de l'homme, qui cause à autrui un dommage, oblige celui par la faute duquel il est arrivé, à le réparer ;*

pour négligence ou imprudence... :

Art. 1383 — *Chacun est responsable du dommage qu'il a causé non seulement par son fait, mais encore par sa négligence ou par son imprudence ;*

ou même sans faute, du fait des personnes dont on doit répondre et des choses que l'on a sous sa garde :

Art. 1384 — *On est responsable non seulement du dommage que l'on cause par son propre fait, mais encore de celui qui est causé par le fait des personnes dont on doit répondre, ou des choses que l'on a sous sa garde [...].*

Il est également responsable des dommages causés par la ruine de son ouvrage, lorsqu'elle est arrivée par suite d'un défaut d'entretien ou par vice de construction :

Art. 1386 — *Le propriétaire d'un bâtiment est responsable du dommage causé par sa ruine, lorsqu'elle est arrivée par suite du défaut d'entretien ou par le vice de sa construction.*

Néanmoins, dans ce dernier cas, la responsabilité conjointe des maîtres d'œuvre et des entrepreneurs qui ont participé à la réalisation peut être engagée au titre de la responsabilité décennale visée aux articles 1792 et 2270 du code civil.

Le code de l'environnement (art. L. 211-5) stipule que toute personne, donc en particulier le propriétaire ou l'exploitant d'un barrage, qui a connaissance

de tout incident ou accident présentant un danger pour la sécurité civile, la qualité, la circulation ou la conservation des eaux, doit tenir informés le préfet et le maire.

D'autre part, ce même article demande que « la personne à l'origine de l'incident ou de l'accident et l'exploitant ou, s'il n'existe pas d'exploitant, le propriétaire, sont tenus, dès qu'ils en ont connaissance, de prendre ou faire prendre toutes les mesures possibles pour mettre fin à la cause de danger ou d'atteinte au milieu aquatique, évaluer les conséquences de l'incident ou de l'accident et y remédier ».

Enfin, le code de l'environnement (article L. 215-11) précise que le propriétaire de l'ouvrage est garant des dommages causés aux chemins et aux propriétés.

En résumé, quelle que soit l'importance de l'ouvrage, le propriétaire est pleinement responsable, tant au civil qu'au pénal, des dommages qui peuvent être occasionnés par l'ouvrage et en particulier, le cas échéant, par sa rupture. Cette responsabilité peut être atténuée dans certaines situations, mais, a contrario, le défaut manifeste d'entretien et de surveillance de l'ouvrage sera de nature à aggraver les circonstances.

La réglementation spécifique aux barrages

En France, le régime général qui s'applique aux barrages est celui de la police de l'eau et des milieux aquatiques, qui repose sur la loi 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau codifiée dans le code de l'environnement, notamment aux articles L. 214-1 à 10, et sur ses décrets d'application. Cela concerne tous les ouvrages hydrauliques autres que ceux concédés au titre de la loi du 16 octobre 1919 (barrages liés à des aménagements hydroélectriques de puissance supérieure à 4 500 kW), qu'ils soient ou non situés sur des cours d'eau et que ces cours d'eau soient ou non domaniaux.

Le contrôle des barrages autorisés est exercé par les services de police de l'eau pour le compte du ministère chargé de l'environnement.

La conservation de l'ouvrage en bon état de service

Au-delà des considérations de responsabilité, l'objectif de conserver l'ouvrage en bon état de fonctionnement justifie à lui seul la surveillance et l'entretien réguliers.

Deux arguments à cela :

- un bon entretien du barrage permettra de freiner son vieillissement et donc d'augmenter sa longévité ; des petits travaux réguliers pourront éviter des interventions lourdes suite à des désordres évolutifs ;
- la surveillance régulière est indispensable pour détecter à temps tout phénomène nouveau, suivre tout phénomène évolutif et prendre sereinement les

mesures qui s'imposent ; le bon entretien de l'ouvrage facilite grandement sa surveillance.

Domaine d'application du guide

Le présent guide a pour objectif de fournir des recommandations adaptées aux petits barrages en ce qui concerne leur surveillance et leur entretien. Il tient compte des spécificités de ces ouvrages et en particulier :

- de la connaissance souvent imprécise ou fragmentaire des dispositions constructives, surtout pour les barrages âgés de plus de 10 à 15 ans (archives incomplètes ou dispersées) ;
- de la faiblesse, voire de l'absence de dispositif d'auscultation ;
- de la tenue à jour plus ou moins rigoureuse du registre de l'exploitant (et très souvent son absence pure et simple) qui rendent difficiles les appréciations sur le comportement de l'ouvrage en service ;
- de l'adoption, pour raisons d'économie, de dispositions constructives parfois critiquables et pouvant conduire à un vieillissement prématuré de certaines parties de l'ouvrage.

Les recommandations contenues dans le présent guide s'appliquent à tous les petits barrages de plus de 4 à 5 m de hauteur au-dessus du terrain naturel et de plus de 40 à 50 000 m³ de capacité¹. Par petit barrage, on entend barrage de hauteur inférieure à 20 m environ (hauteur mesurée par rapport au terrain naturel).

Ces recommandations s'appliquent à **tous types de barrages**, y compris :

- les barrages écrêteurs de crues qui sont la plupart du temps vides ;
- les « digues² » d'étangs ;
- les bassins de stockage d'eau comportant des remblais en élévation par rapport au terrain naturel, que ces bassins soient dédiés au stockage permanent ou au stockage temporaire pendant les crues ;
- les retenues d'altitude dédiées à la production de neige artificielle.

La plupart des recommandations figurant dans ce document sont données en fonction de la hauteur du barrage. Cependant, un autre critère pour apprécier l'importance du barrage consiste à croiser la hauteur du barrage et son volume. En France, on adopte parfois le paramètre $H^2\sqrt{V}$, H étant la hauteur du barrage au-dessus du terrain naturel en mètres et V le volume de la retenue en millions de m³ (ou hm³). Sur le graphe ci-après (figure 1), sont représentées les courbes $H^2\sqrt{V}$ pour les valeurs suivantes : 5, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000.

1. La limite basse ainsi fixée présente un caractère arbitraire et doit donc, le cas échéant, être modulée, en particulier vis-à-vis des risques en aval.

2. Le terme « digue », utilisé très souvent dans le langage courant, est impropre ; ces ouvrages sont en général implantés en travers d'une vallée sèche ou du lit mineur d'un petit cours d'eau et il s'agit donc de barrages.

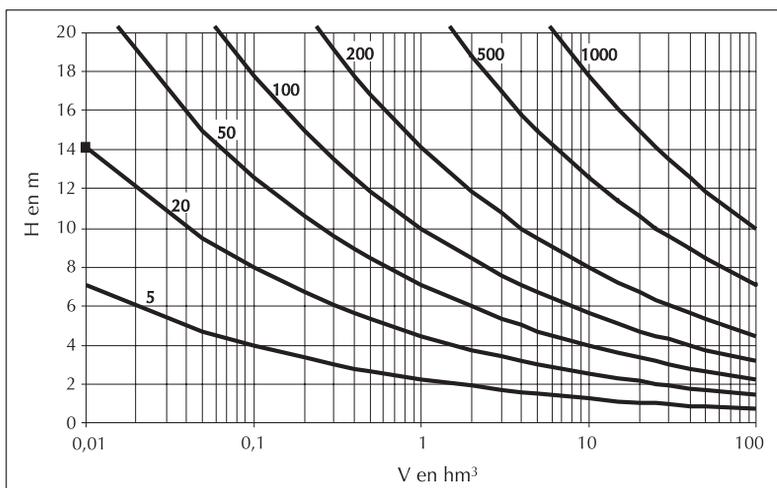


Figure 1. Courbes H^2/V .

Enfin, **l'importance des enjeux concernés par une éventuelle rupture** de l'ouvrage doit bien sûr être également prise en compte et pourra conduire à renforcer les prescriptions pour la surveillance.

Rôle des intervenants

Nous pouvons schématiquement distinguer les intervenants suivants lors de la construction puis lors de l'exploitation d'un barrage :

- le propriétaire ;
- le service de contrôle ;
- le maître d'œuvre pour la construction ;
- l'entrepreneur réalisant les travaux ;
- l'exploitant ;
- l'ingénieur (ou le bureau d'études spécialisé) chargé de l'auscultation et du suivi.

Cette liste n'est bien sûr pas limitative, et inversement pour certains ouvrages, tous les intervenants ci-dessus ne seront pas représentés. Les rôles respectifs des divers intervenants sont détaillés ci-après, en s'intéressant plus particulièrement aux phases de première mise en eau et d'exploitation de l'ouvrage, ce qui explique que nous ne développons pas le rôle de l'entrepreneur.

Le propriétaire

Le propriétaire, parfois désigné sous le terme maître d'ouvrage, est totalement responsable de son ouvrage (*cf. § Responsabilité du propriétaire*), lors de sa construction, de sa première mise en eau, de son exploitation et, le cas échéant, de son démantèlement.

Au-delà des phases d'avant-projet et de construction du barrage qu'il confie à des bureaux d'études et à des entreprises spécialisées, le propriétaire est chargé :

- du suivi de la première mise en eau ;
- de la constitution et de la tenue à jour du dossier contenant tous les documents relatifs au barrage et à ses ouvrages annexes ;
- de l'exploitation des ouvrages ;
- de la tenue à jour du registre de l'exploitant ;
- de la surveillance et de l'auscultation (y compris son interprétation) ;
- de l'entretien des ouvrages et, en particulier, du maintien des organes hydrauliques en bon état de fonctionnement.

Il peut confier par contrat certaines de ces tâches à un exploitant ou à un bureau d'études spécialisé.

Par ailleurs (art. L. 211-5 du code de l'environnement), le propriétaire doit informer sans délai le service de l'État chargé de la police de l'eau de tout événement particulier (désordres, comportement anormal de l'ouvrage, crues importantes...).

Le maître d'œuvre pour la construction

Le propriétaire confie par contrat à un maître d'œuvre spécialisé les tâches suivantes qui relèvent d'une mission dite d'ingénierie :

- reconnaissances et études préalables ;
- établissement du projet de l'ouvrage et du dossier de consultation des entreprises ;
- contrôle de l'exécution des travaux ;
- réception des travaux et établissement du dossier des ouvrages conformes à l'exécution³ ;
- suivi de la première mise en eau.

Nous ne développons pas plus le rôle du maître d'œuvre dans la mesure où son intervention est terminée à la fin de la première mise en eau et qu'il n'intervient donc pas dans la phase d'exploitation du barrage (à moins que ce ne soit dans un autre cadre contractuel — en tant qu'exploitant par exemple).

Il faut toutefois insister sur le fait que la mission du maître d'œuvre ne devrait pas se terminer avant la fin de la première mise en eau, et comprendre donc la remise d'un rapport de mise en eau. Il convient de stipuler clairement ce point dans le contrat de maîtrise d'œuvre.

Cette mission se poursuit donc largement au-delà de la fin des travaux de construction du barrage, en particulier en cas de déficit hydrologique allongeant la durée du premier remplissage.

L'exploitant

Pour les petits barrages, le propriétaire exploite le plus souvent directement son barrage. Mais il peut aussi confier à un exploitant tout ou partie des tâches suivantes :

- exploitation de la retenue ;
- inspection visuelle régulière de l'ouvrage ;
- entretien courant du barrage et de ses abords ;
- vérification périodique du bon fonctionnement des dispositifs de commande et de manœuvre des organes hydrauliques ;
- mesures périodiques des instruments d'auscultation et vérification de leur bon fonctionnement, si le barrage est doté de tels instruments ;
- rédaction de rapports annuels d'exploitation.

Le contrat doit définir précisément la nature et la périodicité de ces différentes prestations.

3. L'établissement du dossier des ouvrages conformes à l'exécution, à partir des plans de récolement fournis par les entreprises, est capital pour l'exploitation et le suivi ultérieurs du barrage.

L'ingénieur ou le bureau d'études chargé de l'auscultation et du suivi

L'intervention d'un bureau d'études ou d'un expert spécialisé en barrages est recommandée dès lors que ni le propriétaire, ni l'exploitant ne possèdent les compétences suffisantes. Si l'exploitant possède ces compétences, les prestations décrites ci-dessous doivent être intégrées au contrat qui le lie au propriétaire.

Le contrôle de la qualification des bureaux d'études peut se faire par la nomenclature proposée par l'OPQIBI. Ce dernier organisme, habilité par les différents ministères, est chargé de qualifier l'ensemble de l'activité de l'ingénierie. Le site Internet <http://www.opqibi.com> permet d'accéder de façon transparente et gratuite au catalogue des qualifications et aux qualifications des bureaux d'études dans leur domaine de compétence. En ce qui concerne l'ingénierie des barrages, deux qualifications de l'OPQIBI sont à retenir :

- **1803** « Ingénierie de canaux et d'ouvrages fluviaux hydrauliques et portuaires courants » : cette qualification indique que le bureau d'études est compétent pour la conception de retenues **jusqu'à 5 mètres** ;
- **1804** « Ingénierie de canaux et d'ouvrages fluviaux hydrauliques et portuaires complexes » : cette qualification indique que le bureau d'études est compétent pour la conception de retenues **au-dessus de 5 mètres**.

S'il s'agit d'un expert individuel, on s'appuie sur ses références et sur son expérience.

Dans la suite du document, nous emploierons le terme d'ingénieur spécialiste pour qualifier indistinctement le bureau d'études ou l'expert individuel.

Les prestations de l'ingénieur spécialiste sont généralement les suivantes, dans le cadre d'une convention passée avec le propriétaire :

- report sur graphiques interannuels des mesures d'auscultation et de la cote de la retenue ;
- analyse et interprétation de ces mesures ;
- établissement d'un rapport périodique de suivi de l'ouvrage ;
- visites techniques approfondies de l'ouvrage⁴ ;
- avis et conseils au propriétaire en cas d'anomalies constatées.

Pour les plus petits barrages, non dotés de dispositifs d'auscultation, cette intervention pourrait se réduire aux visites périodiques de l'ouvrage et à l'établissement de fiches de suivi décrivant l'état du barrage et de ses organes hydrauliques, et donnant toutes recommandations utiles en matière d'entretien courant ou de réparations.

4. La périodicité de ces visites est précisée au § « Inspection visuelle ».

Le service du contrôle

La description détaillée du rôle du service de l'État chargé du contrôle des barrages n'est pas l'objet de ce document. Nous en donnons seulement les principes généraux.

Pour tous les barrages ne faisant pas l'objet d'une concession d'exploitation hydroélectrique, le contrôle incombe au service de police de l'eau.

Son rôle est le suivant :

- instruire le dossier d'autorisation (ou de déclaration) de l'ouvrage selon les modalités définies par les textes d'application de la loi sur l'eau, en particulier les décrets 93-742 et 93-743 du 29 mars 1993 ;
- prendre par la suite pendant la vie de l'ouvrage, par arrêté préfectoral, toute prescription complémentaire nécessaire à la sauvegarde de la sécurité civile et des milieux aquatiques ;
- s'assurer que le propriétaire a pris toutes les dispositions nécessaires en vue d'un suivi et d'une surveillance appropriés de son barrage : consistance du dispositif d'auscultation, périodicité des mesures, tenue du registre du barrage, compétences techniques des intervenants ;
- organiser, le cas échéant, des visites périodiques de contrôle, en rédiger le procès-verbal et vérifier que les recommandations figurant dans les procès-verbaux de visites sont bien suivies d'effet.

Plusieurs actions peuvent être entreprises par le service de police de l'eau pour faire respecter les prescriptions préfectorales ou pour faire respecter la sécurité civile et la gestion équilibrée de la ressource en eau :

- retrait ou modification de l'autorisation, sans indemnité de la part de l'État (art. L. 214-4 du code de l'environnement) ;
- soumission de la remise en état d'un ouvrage, suite à un accident, à une nouvelle procédure d'autorisation ou de déclaration si sa remise en service entraîne des modifications de l'ouvrage, de son fonctionnement ou de son exploitation, ou si l'accident est révélateur de risques insuffisamment pris en compte initialement (art. 37 du décret 93-742) ;
- sanctions administratives et/ou pénales en cas d'infractions de mises en demeure ou d'infractions (art. L. 216-1 et suivants du code de l'environnement).

A contrario, il n'est ni dans le rôle ni de la responsabilité du service de contrôle d'accomplir des tâches ne relevant pas de sa mission, comme par exemple :

- la lecture périodique de certains instruments ;
- l'interprétation de l'évolution de telle ou telle mesure ;
- la définition de dispositions techniques relatives au barrage.

Dans le cas contraire, il donnerait l'impression de prendre à son compte le suivi de la sécurité du barrage, ce qui contribuerait à brouiller les responsabilités respectives du maître d'ouvrage et du service de contrôle.

La surveillance des petits barrages

Ce chapitre décrit les obligations du propriétaire du barrage, ou du prestataire auquel il a confié l'exploitation de son ouvrage, en matière de surveillance des petits barrages.

Principes généraux de la surveillance

La surveillance d'un ouvrage a pour but essentiel de connaître, et si possible de prévenir, toute dégradation afin de le conserver en bon état de sécurité et ainsi apte à remplir ses fonctions.

On cherche principalement à détecter les anomalies et désordres et à évaluer leurs éventuelles évolutions. Ces anomalies peuvent être dues à des mécanismes de vieillissement du barrage. Ils sont généralement lents mais une évolution rapide n'est pas totalement exclue, en particulier dans les premières années après la mise en eau. *A contrario*, l'âge du barrage ne constitue pas une garantie de bon état, comme a pu par exemple le montrer la rupture brutale du petit barrage des Ouches (63) par érosion interne plus de deux cents ans après sa construction⁵.

La méthodologie de suivi doit fournir les moyens de détecter les anomalies et les désordres, d'apprécier les vitesses d'évolution des mécanismes de vieillissement et leur aboutissement probable, en séparant les phénomènes réversibles des phénomènes irréversibles. Ceci afin de permettre au responsable de l'ouvrage de décider de la nature et de l'urgence des interventions.

La première mise en eau constitue de ce point de vue une phase essentielle. Il s'agit d'un test en vraie grandeur de l'ouvrage qui doit permettre de déceler d'éventuelles anomalies et de juger de son comportement par rapport aux prévisions du projet. La surveillance pendant cette période doit être continue et complète.

Pendant **la phase d'exploitation**, la surveillance prend un rythme moins intense, adapté à la dimension de l'ouvrage, à son état général et aux circonstances extérieures. En particulier, la surveillance doit impérativement être renforcée en cas d'anomalie ou de désordre constaté, ainsi qu'à l'occasion des crues.

5. Le barrage des Ouches, de 5 m de hauteur et 45 000 m³ de capacité, s'est rompu en moins d'une heure le 15 juillet 2001, en dehors de tout épisode de crue. L'alerte a pu être donnée à temps et aucune victime ne fut à déplorer dans la ville de Châteauneuf-les-Bains située 5 km en aval, mais les dégâts matériels furent importants : routes endommagées, maisons inondées, véhicules emportés.

La surveillance des barrages repose sur les éléments suivants :

- *l’inspection visuelle* : c’est une méthode qualitative qui intègre de très nombreux paramètres et qui permet de détecter de l’ordre de 90 % des anomalies et désordres susceptibles d’affecter l’ouvrage ;
- *la vérification périodique du bon fonctionnement des vannes* (de prise d’eau, de vidange et, le cas échéant, d’évacuation des crues). Cette vérification doit être systématique à l’occasion des visites techniques approfondies, mais l’exploitant peut procéder à des essais plus fréquents ;
- *l’auscultation* : c’est une méthode quantitative qui est basée sur l’analyse des mesures fournies par une instrumentation spécifique à chaque ouvrage. On mesure essentiellement des déplacements, des déformations, des pressions, des débits. Une analyse fine est susceptible de mettre en évidence d’éventuelles anomalies dans le comportement d’un barrage avant même que celles-ci ne se manifestent par des signes extérieurs visibles. Par ailleurs, il peut être intéressant d’ausculter finement un désordre apparu sur l’ouvrage (une fissure par exemple). L’auscultation fait l’objet d’un chapitre spécifique du présent guide ;
- *la tenue à jour du registre de l’ouvrage* (ou registre de l’exploitant), qui consigne en particulier les opérations de surveillance.

L’inspection visuelle

Il convient de distinguer trois niveaux dans l’inspection visuelle du barrage et de ses abords :

- l’inspection visuelle de routine ;
- l’inspection visuelle à l’occasion des crues ;
- les visites techniques approfondies.

Les deux premiers niveaux sont du ressort du propriétaire ou de son exploitant. Le troisième niveau correspond aux visites techniques de l’ingénieur spécialiste chargé du suivi de l’ouvrage.

L’inspection visuelle de routine ou à l’occasion des crues est faite par un agent désigné par le propriétaire ou l’exploitant. Si ces tâches ne nécessitent pas une compétence affirmée en génie civil, il importe toutefois que l’agent soit motivé, consciencieux et précis. Aussi doit-il au préalable avoir reçu une bonne information sur l’ouvrage et une formation technique minimale sur les mécanismes en jeu, les anomalies et désordres à rechercher et les objectifs de l’inspection et de l’auscultation.

L’inspection visuelle de routine

Elle a pour objectif de déceler rapidement tout phénomène nouveau affectant le barrage et de suivre qualitativement les évolutions.

Pendant la première mise en eau, la périodicité de ces inspections est liée à la vitesse de montée du plan d’eau. *On peut, à titre indicatif, retenir un rythme hebdomadaire* qui peut être plus espacé si le niveau de la retenue n’évolue pas pendant une longue période. *A contrario*, une visite s’impose après chaque épisode pluvieux significatif.

En phase d'exploitation normale et en l'absence de tout désordre ou anomalie quant au comportement de l'ouvrage, la périodicité devient mensuelle (voire bimestrielle⁶ pour les plus petits barrages). Il ne paraît pas raisonnable d'espacer plus ces visites.

Les visites doivent être plus rapprochées dès que l'on constate une anomalie ou un désordre nouveau. L'observation doit être systématique après chaque crue (§ Inspection visuelle).

Les visites doivent se dérouler selon un circuit préétabli (défini par exemple par l'ingénieur spécialiste) et ne négliger aucun point d'observation.

L'agent chargé des visites de routine doit être en possession des équipements de sécurité (casque et lampe s'il y a une galerie, chaussures) et avoir tout le nécessaire pour le report des observations et mesures (plans, fiches, appareil photographique, etc.).

Les points principaux de l'inspection sont les suivants :

Pour tous les barrages :

- niveau d'eau dans la retenue ;
- apparition ou évolution de zones humides sur le parement ou le pied aval du barrage ;
- apparition ou évolution de fuites, y compris dans la zone en aval du barrage ;
- obstruction des vannes ou des seuils par des corps flottants ;
- obstruction du coursier de l'évacuateur de crue par de la végétation, des éboulements... ;
- état des appareils d'auscultation, s'ils existent.

Pour les barrages en remblai (terre ou enrochement) :

- fuites localisées, éventuellement avec entraînement de grains de sol ;
- apparition de bourrelets et/ou de fissures en crête ou sur le parement aval (amorces de glissement) ;
- tassements, en particulier en crête ou au contact d'ouvrages en béton ;
- creusement de ravines sur les parements amont et aval ;
- points bas sur la crête du remblai ;
- désordres sur la protection antibatillage (pierres déplacées, désagrégées...) ;
- végétation arbustive sur les talus et près du pied aval ;
- corrosion et rupture des fils des cages d'ouvrages en gabions ;
- dégâts dus aux animaux fouisseurs.

Pour les barrages en béton ou en maçonnerie :

- dégradation des joints du parement amont ;
- décollements de l'enduit amont ;
- fissures (ouvertes ou fermées, avec ou sans fuites, traversantes ou non) ;
- dépôts de calcite ;
- apparition ou évolution de zones de fuites ou de suintements.

6. Bimestriel : une fois tous les deux mois.

Lorsque la visite de routine s'effectue à retenue basse, voire vide, c'est l'occasion d'inspecter attentivement toutes les parties habituellement noyées : parement amont, tête amont des ouvrages de prise et de vidange, berges de la retenue. Il convient aussi de noter l'état d'envasement ou d'engrèvement de la retenue.

Ces visites doivent être mentionnées dans le registre du barrage avec indication de toute observation particulière et prise de photographies si besoin.

Si le barrage est doté d'un dispositif d'auscultation, l'exploitant procède, à l'occasion de ces visites, aux mesures simples telles que débits, piézométrie, et vérifie le bon fonctionnement des appareils.

L'inspection visuelle à l'occasion des crues

C'est lors des crues que les barrages sont soumis aux sollicitations les plus sévères : cote du plan d'eau élevée, débits importants sur le déversoir, ruissellement sur les parements. Une inspection visuelle détaillée s'impose donc dans ces occasions.

L'inspection **pendant** la crue est riche d'informations, mais elle n'est pas toujours possible car la crue peut survenir de nuit. Cependant, chaque fois qu'on le peut, on s'attache à observer les points suivants pendant la crue :

- niveau maximum atteint par l'eau ;
- durée de la crue ;
- corps flottants et vagues ;
- fonctionnement du déversoir : position du vannage éventuel, aspect de la lame d'eau, écoulement en pied de coursier, contournement éventuel des bajoyers...

L'inspection **après** la crue doit être systématique. Elle porte sur les points suivants :

- relevés d'indices permettant de connaître le niveau maximum atteint par l'eau : dépôts de branchages et brindilles, traces sur le limnimètre ou les murs en béton (attention à ne pas confondre avec les indices liés à une précédente crue) ;
- vérification qu'il n'y a pas eu de surverse sur le couronnement de l'ouvrage (indices à rechercher : présence de végétation couchée, d'affouillements, de poissons morts...) ; observations sur le talus aval d'un barrage en terre ou en pied aval des parties latérales d'un barrage en maçonnerie ou en béton ;
- état du déversoir et de la fosse de dissipation d'énergie : érosion régressive, contournement de bajoyers, fondations sous-cavées, mouvements des structures ;
- observation de l'état du parement amont et de sa protection dans la zone de batillage ;
- creusement de ravines par ruissellement sur les talus (en particulier le talus aval) ;
- apparition de nouvelles zones de fuites, augmentation sensible ou extension des fuites préexistantes (en mesurer les débits si possible) ;
- mesure des appareils d'auscultation afin de détecter toute anomalie éventuelle.

Ces observations relevées lors de l'inspection sont consignées dans le registre du barrage et font, le cas échéant, l'objet d'un dossier photographique. Elles conduisent, suivant les cas, à des travaux d'entretien d'urgence ou à des travaux plus importants de réfection. En cas de très forte crue ou de crue ayant entraîné des désordres importants, un rapport est envoyé au service de contrôle.

Ces observations en crue ou postcrue sont particulièrement cruciales pour les ouvrages écrêteurs de crues qui ne sont soumis à la charge hydraulique qu'à ces occasions.

L'inspection après les séismes

On recommande une visite aussitôt après un séisme. On procédera à l'inspection de toutes les parties observées lors des visites de routine en notant les différences éventuelles. On surveillera plus particulièrement l'apparition de fissures sur les barrages ou les organes en béton et de mouvements sur les barrages en remblai (glissements, tassements...). On s'assurera que les parties mobiles (vannes, clapets) fonctionnent correctement sur toute leur plage de manœuvre. Si besoin, on fera appel à l'ingénieur spécialiste pour une visite technique approfondie.

Les visites techniques approfondies

La visite technique approfondie est effectuée par l'ingénieur spécialiste chargé, par le propriétaire, du suivi de l'ouvrage. La visite éventuelle du responsable de l'État chargé du contrôle sera si possible conjointe à la visite de l'ingénieur spécialiste.

Périodicité

On peut recommander la périodicité suivante pour les visites techniques approfondies de l'ingénieur spécialiste :

- une fois par an pour les barrages dont le paramètre $H^2\sqrt{V}$ est supérieur à 200 ou lorsque le barrage est classé comme intéressant la sécurité publique⁷ ;
- une fois tous les deux ans pour les barrages dont le paramètre $H^2\sqrt{V}$ est compris entre 50 et 200 ;
- une fois tous les trois à cinq ans pour les barrages dont le paramètre $H^2\sqrt{V}$ est inférieur à 50 ;
- dans le cas particulier des barrages écrêteurs de crues, visite après chaque crue importante.

Des visites intermédiaires peuvent s'imposer à la demande du propriétaire ou de l'exploitant si ceux-ci constatent un phénomène inquiétant lors des inspections de routine.

La période la plus propice à la meilleure observation d'un barrage est celle où la retenue est pleine.

7. Pour les barrages classés comme intéressant la sécurité publique, il est recommandé que la visite du service de contrôle concorde avec la visite de l'ingénieur spécialiste.

Organisation de la visite

Il convient, lors de la visite, de disposer d'un dossier technique à jour, comprenant au minimum :

- les informations sur la conception et la réalisation du barrage (coupe type, matériaux utilisés, organes divers...), et sur les gros travaux éventuels ;
- le compte rendu de la précédente visite ;
- le cas échéant, les résultats des dernières mesures d'auscultation.

Déroulement de la visite

Nous présentons, en annexe I, une fiche synthétique de visite qui dresse la liste des observations à faire avec des rubriques spécifiques par type d'ouvrage. La dernière colonne renvoie à des commentaires, permettant d'éclaircir certains points et de mieux guider la visite.

Fonctionnement des organes hydrauliques et appareils d'auscultation

À l'occasion de ces visites techniques, on procède à l'inspection des organes hydrauliques de sécurité (pour autant que le barrage en soit doté) et à leur manœuvre :

- organes mobiles de l'évacuateur de crues ;
- vannes de vidange et vannes de prise d'eau.

Si le barrage est doté d'un dispositif d'auscultation, on en vérifie le bon fonctionnement *ainsi que l'exécution correcte des mesures* par l'agent qui en est chargé.

Rapport de visite

À l'issue de la visite approfondie, l'ingénieur spécialiste rédige un rapport complet, décrivant toutes les observations faites lors de la visite, rendant compte des essais de fonctionnement des organes hydrauliques et des instruments d'auscultation, et recommandant tous travaux ou interventions qui seraient nécessaires.

Ce rapport est adressé par le propriétaire au service de contrôle.

Le registre du barrage ou « registre de l'exploitant »

Le propriétaire du barrage, ou l'exploitant agissant pour le compte du propriétaire, doit tenir un registre *dès le début de la première mise en eau*. Ce document est extrêmement précieux, car il constitue en quelque sorte le « journal » du barrage.

Il s'agit d'un cahier tenu à jour par la personne chargée de la surveillance régulière du barrage. Il est recommandé de choisir un document à couverture cartonnée résistante et aux pages numérotées.

Sont consignés dans ce registre :

- le compte rendu de l'observation visuelle de routine (avec éventuellement la mention RAS si rien n'est à signaler lors de la visite) ;

- le compte rendu de l’observation à l’occasion des crues ;
- les mesures d’auscultation si elles ne font pas l’objet de fiches spécialement prévues à cet effet ;
- des informations sur l’exploitation du barrage (évolution de la cote de la retenue, dates de début et de fin des prélèvements, volumes prélevés, manœuvres de vannes, chasses...) ;
- la description de tous les travaux d’entretien et de réparation ;
- la mention des visites techniques approfondies avec nom et signature des participants.

Toutes les indications portées sur le registre sont datées. Tout au long de son utilisation, le registre doit être conservé avec soin par l’agent d’exploitation, transporté et stocké à l’abri de l’humidité (pochette plastique). Une fois qu’un cahier est terminé, il est recommandé d’en faire un duplicata et de stocker le cahier et son duplicata dans deux lieux sûrs différents.

Le registre doit être présenté à toute requête du service de l’État chargé du contrôle.

L'auscultation des petits barrages

Il s'agit d'une méthode quantitative basée sur la mesure d'instruments, choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage. Ce dispositif, souvent très simple pour les petits barrages, sera plus dense pour les barrages de dimension moyenne. Partie intégrante du projet, il a vocation à évoluer pendant la durée de vie de l'ouvrage par abandon d'instruments défectueux ou superflus et par ajout d'autres instruments en cas de comportement anormal du barrage.

L'ingénieur spécialiste devra proposer toutes les évolutions nécessaires du dispositif d'auscultation en fonction de l'état des appareils et du comportement de l'ouvrage.

Le dispositif d'auscultation doit être constitué d'instruments simples, robustes et de lecture facile.

Après avoir décrit les principaux instruments d'auscultation adaptés aux petits barrages, nous donnons ci-après des recommandations concernant la conception du dispositif d'auscultation et la périodicité des mesures en fonction du type de barrage et de sa hauteur.

Les appareils d'auscultation des petits barrages

Le but recherché est de réunir des informations suffisantes, en nombre et en qualité, pour détecter en temps utile les mécanismes évolutifs susceptibles de nuire à la sécurité de l'ouvrage. Le problème est donc de définir, pour le barrage considéré, les types d'appareillage et leur implantation apportant une garantie satisfaisante pour atteindre cet objectif. On veillera aussi à ce que les points de mesure soient facilement accessibles.

Un principe essentiel est de privilégier la *qualité* des mesures — choix judicieux des appareils de mesure et de leur localisation — à la *quantité*.

En ce qui concerne les *capteurs*, ils doivent répondre aux exigences suivantes :

- robustesse et longévité, car les appareils sont parfois inaccessibles après la construction de l'ouvrage ;
- facilité de la mesure, qui doit pouvoir être faite dans de bonnes conditions de fiabilité, par un opérateur non spécialisé ;
- précision, car les mesures relevées sont souvent de faible amplitude ;

- facilité dans la vérification de la qualité de la mesure, ce qui fait préférer des appareils simples à des appareils « boîte noire » ;
- fidélité, puisque toute dérive fonctionnelle entraîne une perte dans la qualité de l'interprétation basée sur la connaissance des évolutions ;
- et, si possible, facilité de la maintenance, puisque les appareils sont eux-mêmes soumis au vieillissement et que leur réparation ou remplacement peut un jour s'avérer nécessaire.

Il n'est pas question, et ce n'est d'ailleurs pas le propos d'un tel guide, de décrire tous les appareils d'auscultation des barrages, d'autant que l'imagination des ingénieurs a été fertile en la matière.

Nous ne présentons donc que les types d'appareils les plus répandus, ou que nous pensons les mieux adaptés, dans le contexte des petits et moyens barrages en France.

Mesure de la cote du plan d'eau

Cette mesure participe à trois objectifs :

- améliorer la gestion de la retenue par une connaissance continue des volumes d'eau disponibles, ce qui nécessite, bien sûr, de connaître la relation entre la cote et le volume de la retenue ;
- participer à l'auscultation du barrage en permettant d'examiner l'influence de la cote de la retenue sur les mesures de certains instruments (en particulier, débits de drainage et piézométrie) ;
- enrichir les données hydrologiques.

Seul le dernier objectif justifie, dans certains cas, l'installation d'un limnimètre enregistreur. Dans tous les autres cas, et en particulier pour les besoins de l'auscultation, une échelle limnimétrique convient tout à fait pour la mesure de la cote du plan d'eau.

Deux solutions sont possibles :

- si le barrage comporte des parties immergées verticales (tour de prise des barrages en remblai ou parement vertical des barrages poids), on y scelle une échelle continue couvrant l'amplitude des variations possibles du plan d'eau (photo 1) ;
- dans le cas contraire, on installe une série d'échelles de 1 m de hauteur, profondément scellées dans le sol et implantées selon les courbes de niveau (photo 2).

Afin de résister à l'oxydation, ces échelles sont le plus souvent en tôle émaillée. La précision de la mesure est de ± 1 cm.

Mesure des débits

Le contrôle des débits est d'abord visuel. Leur mesure suppose leur collecte : fossé de pied, aménagement d'exutoires.

Deux procédés de mesure des débits sont envisageables :

- par empotement ;
- par seuil calibré.

Ces dispositifs sont installés sur les ouvrages neufs à la sortie des organes de drainage, et sur les barrages en service dans des zones où l'on observe des fuites. Il est aussi possible (et recommandé) d'équiper un barrage existant d'un fossé de pied aval permettant la collecte des fuites en provenance du remblai et/ou de la fondation.

a) La mesure par empolement se fait au débouché d'un tuyau ou d'un caniveau et à l'aide d'un récipient gradué et d'un chronomètre. Il faut disposer d'une dénivellée suffisante (de l'ordre de 10 cm minimum) pour pouvoir placer le récipient gradué recueillant l'écoulement (photo 3). Le récipient gradué peut être remplacé par un récipient de contenance totale connue, et le chronomètre par une simple montre donnant les secondes. Il existe également des dispositifs prêts à l'emploi qui permettent une lecture directe du débit et évitent donc toute erreur de calcul (dispositifs CAP4 et CAP10 distribués par Télémac). La précision de la mesure est tout à fait satisfaisante pour autant que la capacité du récipient soit adaptée au débit à mesurer. À cette fin, on visera des temps de remplissage de 1 à 5 minutes.

b) La mesure par seuil calibré se fait au débouché d'un caniveau. On y construit un petit ouvrage en béton sur lequel est fixé un déversoir à paroi mince, en métal inoxydable ou en Plexiglas. La meilleure précision est obtenue avec un *déversoir de forme triangulaire* (figure 2C et photos 4a et 4b). Afin d'améliorer encore la précision, l'angle α peut être adapté en fonction de la gamme des débits effectivement mesurés (à titre indicatif, $\alpha < 20^\circ$ pour des débits jusqu'à 1 l/s et $\alpha \approx 80^\circ$ pour des débits maximaux de l'ordre de 10 l/s).

Le débit est donné par :

$$Q = 1420 \tan(\alpha/2) h^{2,5}$$

- h est la charge hydraulique en m, mesurée suffisamment en amont du seuil ;
- Q est le débit en l/s.

Le déversoir peut aussi être de forme rectangulaire (figure 2B). Le débit est alors donné par :

$$Q = 1\,850 (L - 0,2 h) h^{1,5} \quad \text{[formule de Francis]}$$

- Q est le débit en l/s
- L est la largeur du déversoir en m
- h est la charge hydraulique en m, mesurée suffisamment en amont du seuil.

Les deux formules présentées ci-dessus sont valides pour autant que l'écoulement sur le seuil est dénoyé, ce qui exige une dénivellée minimale entre les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval du seuil. En pratique, une dénivellée de 10 cm est en général suffisante. Il faut pour cela que l'eau s'écoule sans obstacles vers l'aval.

L'ouvrage en béton sur lequel est fixé le déversoir doit être réalisé de façon à empêcher son contournement par une partie du débit. Pour cela, on réalise une fondation et des murs latéraux coulés à pleine fouille (figure 2A). Il faut aussi veiller à bien étancher le pourtour de la plaque constituant le déversoir.

La hauteur h de l'eau au-dessus du seuil doit être mesurée à une distance d'au moins 0,60 m en amont du seuil (photo 4). Un limnimètre gradué en mm sera fixé de façon à ce que le zéro soit calé au niveau du fond du seuil. La précision de la lecture est de ± 1 mm.

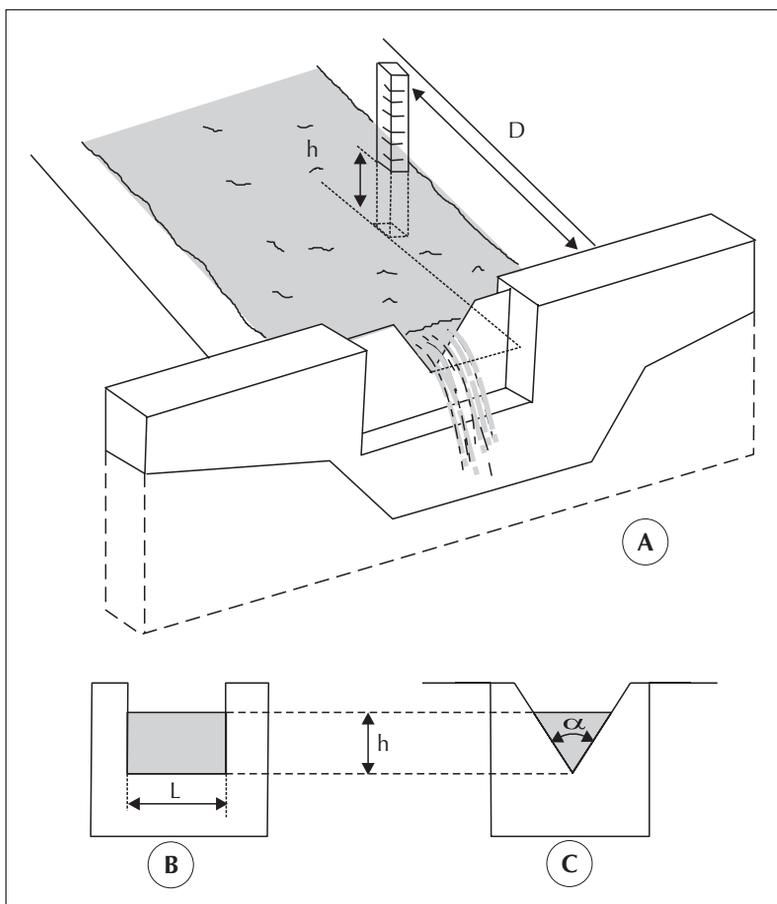


Figure 2. (A) Schéma d'un déversoir à paroi mince ; vue de face d'un déversoir (B) rectangulaire et (C) triangulaire.

Mesure de la piézométrie

On peut classer les appareils en deux familles :

- les piézomètres ;
- les cellules de pression interstitielle.

a) Les piézomètres sont bien adaptés à la mesure du niveau piézométrique dans les fondations et en rives. Il s'agit de forages de faible diamètre (60 à 100 mm), équipés de tubes crépinés⁸ dans les sols meubles, à l'intérieur desquels s'établit un niveau d'eau en équilibre avec le niveau de la nappe phréatique environnante. La « chambre de mesure » est, le plus souvent, limitée à une courte partie du forage, la longueur restante étant isolée par un tubage et un coulis étanches. Une crépine courte fournira la valeur de la piézométrie

8. Une crépine est une portion de tubage comportant de fines fentes : ainsi la pression hydrostatique du milieu environnant se transmet à l'intérieur du tube tandis que les matériaux granulaires sont bloqués par les fentes.

dans une couche donnée du barrage alors qu'une crépine longue fournira la pression maximale sur l'ensemble de la hauteur de la chambre de mesure. Dans le rocher sain, on peut se dispenser du tubage ; il s'agit alors d'un piézomètre intégrant la piézométrie sur toute sa hauteur.

Dans les remblais, on utilise parfois des piézomètres à chambre de mesure longue, en vue de détecter des zones de venues d'eau (par exemple en aval du système de drainage d'un remblai), mais la mesure n'est alors pas vraiment représentative d'un niveau piézométrique. Il faut de plus veiller à ce que le piézomètre ne crée pas de communications indésirables entre des zones théoriquement séparées⁹.

La mesure est basée sur une lecture directe au moyen d'une sonde électrique d'environ 1 cm de diamètre (photos 5a et 5b) donnant la différence de cote entre la nappe phréatique et la tête du piézomètre qui aura été préalablement nivelée. La précision de la mesure est de ± 1 cm. Si le forage est artésien¹⁰, on peut l'équiper d'un manomètre¹¹. Dans tous les cas, la mesure peut être faite par une cellule de pression placée à demeure dans la chambre de mesure, ce qui permet, le cas échéant, une mesure automatique.

La tête du piézomètre (photo 6) doit être bien visible pour ne pas être endommagée par les engins d'entretien. Elle doit être équipée, d'une part, d'un bouchon étanche empêchant la pénétration des eaux de pluie et de ruissellement, et, d'autre part, d'un dispositif anti-vandalisme afin d'éviter qu'on ne vienne le remplir (bouchon vissé et cadenas).

Les piézomètres à tube ouvert sont bien adaptés pour des sols moyennement perméables et dans les roches fissurées. Le temps de réponse du piézomètre est d'autant plus court que le diamètre du tube est petit. Mais on ne peut guère envisager moins de 2 cm de diamètre au risque de coincer la sonde de mesure.

b) La mesure des **pressions interstitielles** dans les remblais est réalisée par des cellules à contre-pression ou à corde vibrante. La pression interstitielle régnant localement dans le remblai est transmise par une pierre poreuse au dispositif de mesure. Les cellules sont posées pendant la construction du remblai aux niveaux et emplacements choisis et, selon le type, un câble ou des tubulures transmettent l'information au poste de mesure situé dans un local. Le soin apporté à la pose de ces cellules est primordial pour la qualité des mesures ultérieures, d'autant que ces appareils ne sont ni réparables, ni remplaçables. La pose de nouvelles cellules peut cependant se faire en forage, ce qui rend possible l'équipement de barrages en service. Il s'agit toutefois d'une opération délicate et relativement coûteuse.

9. Le cas le plus trivial est celui du piézomètre dont la chambre de mesure intercepte le tapis drainant...

10. Un forage est artésien s'il recoupe une nappe phréatique dont le niveau statique est supérieur au niveau de la tête du forage.

11. Le temps de réponse d'un tel piézomètre est plus faible. Toutefois, la présence de bulles d'air dans le tube peut entraîner de fortes erreurs sur les mesures. Ce type de mesure est totalement inadapté, par risque de désaturation, dès que le niveau de la nappe est susceptible de descendre quelques mètres en dessous du niveau du manomètre (les mesures de dépression doivent dans tous les cas être considérées avec prudence). En fait, sur les barrages, on rencontre ce type de piézomètre essentiellement dans les galeries, là où la piézométrie est susceptible d'être plus haute que le niveau de la tête du tube (piézomètres artésiens).

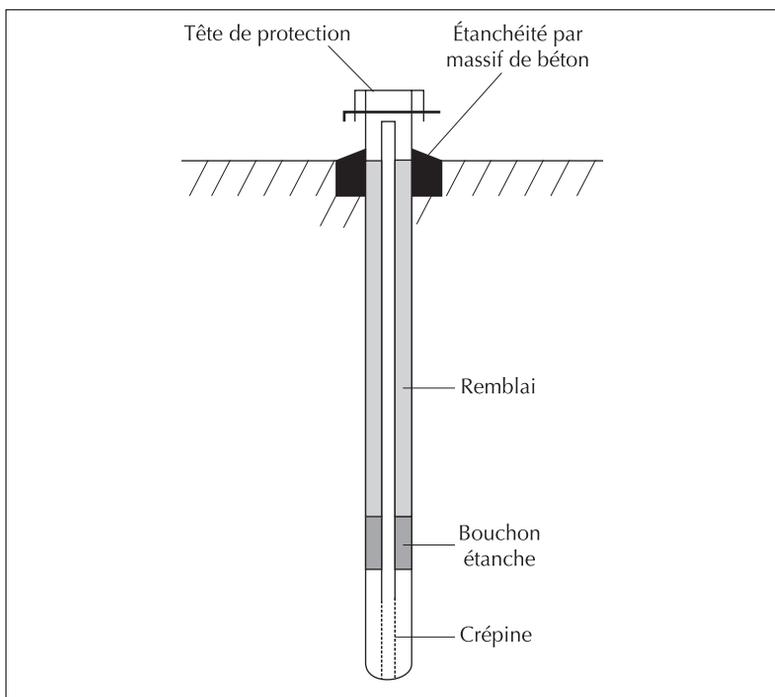


Figure 3. Le piézomètre à tube ouvert.

Les cellules de pression interstitielle ont des temps de réponse plus rapides que les piézomètres. Cependant, le coût du dispositif de mesure les réserve plutôt à des barrages de grande ou moyenne hauteur. Les cellules à corde vibrante sont recommandées pour leur longévité (mis à part les problèmes de léger fluage dans le temps). Leur précision est de l'ordre du demi pour cent (soit 5 cm de colonne d'eau pour une cellule 0-100 kPa).

> La cellule à contre-pression

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression (photo 7a) noyée dans le remblai ou la fondation, une double tubulure flexible reliant la cellule au tableau de mesure, une valise ou un tableau de mesure avec bouteille d'azote sous pression et manomètres. Au tableau de mesure peuvent être reliées plusieurs cellules par l'intermédiaire d'une rampe de robinets (photo 7b). Pour une meilleure longévité, il convient de choisir des tubulures en polyéthylène plutôt qu'en rilsan.

L'intérieur de la cellule comporte une membrane. D'un côté de cette membrane s'exerce la pression interstitielle par l'intermédiaire de la pierre poreuse. Le principe de la mesure consiste à équilibrer la pression interstitielle par une contre-pression appliquée grâce à la bouteille d'azote.

> La cellule à corde vibrante

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression noyée dans le remblai ou la fondation (figure 4), un câble électrique reliant la cellule au tableau de mesure, une valise contenant un dispositif d'excitation de la corde et de mesure de sa fréquence de vibration.

Le principe de la mesure est le suivant : la pression interstitielle se communique par la pierre poreuse à un diaphragme. Une corde métallique est tendue entre un point fixe et ce diaphragme. Les variations de pression communiquées au diaphragme font varier la tension de la corde et donc sa fréquence propre de vibration (comme une corde d'instrument de musique). C'est cette fréquence de vibration que l'on mesure après excitation de la corde par un électroaimant disposé à l'intérieur de la cellule.

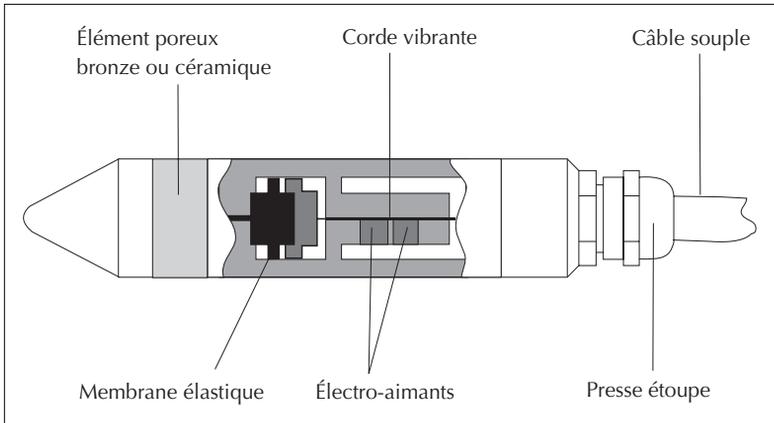


Figure 4. Cellule de pression interstitielle à corde vibrante (d'après catalogue Télémac).

Mesure des déplacements

On peut distinguer schématiquement deux types de mesures de déplacements adaptés aux petits barrages :

- *les mesures topographiques* qui permettent de connaître les déplacements de repères matérialisés sur le barrage par rapport à des bases fixes situées autour de l'ouvrage : nivellement pour suivre les tassements, mesures d'alignement pour suivre des mouvements dans la direction amont-aval, planimétrie pour suivre les mouvements dans les deux directions horizontales ;
- *les pendules et les élongamètres* (ou extensomètres à grande base) qui permettent des mesures de déplacements différentiels entre la table de mesure et le point d'ancrage du fil ou de la barre. Si le point d'ancrage est situé en profondeur dans le rocher de fondation, on mesure alors un déplacement absolu.

Les mesures topographiques sont d'une mise en œuvre assez lourde, ce qui conduit à des périodicités de mesure de l'ordre d'une à deux fois par an, avec la nécessité de faire appel à un géomètre. Elles permettent *a contrario* d'avoir une vision d'ensemble du barrage. Les mesures par pendules ou élongamètres sont plus précises et plus simples (elles peuvent donc être réalisées fréquemment). Mais ces instruments sont coûteux et leur installation doit être faite par des entreprises hautement spécialisées, ce qui concrètement les réserve aux barrages de taille moyenne ou grande.

a) Nivellement

Les mesures de nivellement concernent essentiellement les barrages en remblai.

Les repères de nivellement sont des bornes en béton de dimension suffisante, bien ancrées dans le remblai et munies d'une pointe sur leur face supérieure (figure 5). Ils sont implantés sur le couronnement du remblai (bord amont ou aval). Pour les barrages de plus grande hauteur (à partir de 15 m), on peut prévoir une deuxième ligne de repères sur le parement aval (par exemple sur une risberme).

Ces repères sont nivelés depuis des piliers d'observation placés sur les rives dans des zones stables (figure 6). Ces piliers en béton, de dimension conséquente, sont munis de plaques de centrage pour la fixation d'un niveau à bulle.

Lors des mesures, on réalise systématiquement un cheminement aller et un cheminement retour. La précision dépend des distances de visée. Elle est en général de l'ordre du demi-centimètre et, dans de bonnes conditions, peut atteindre le millimètre.

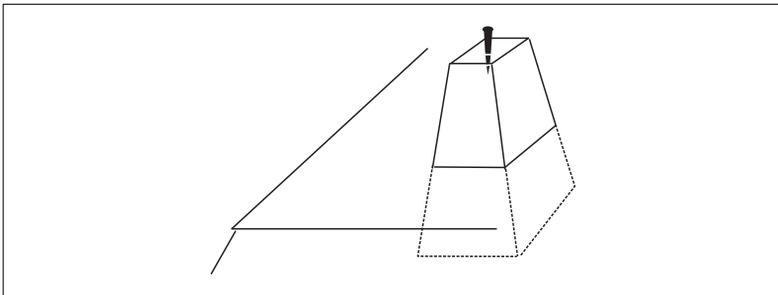


Figure 5. Repère de nivellement en crête de remblai.

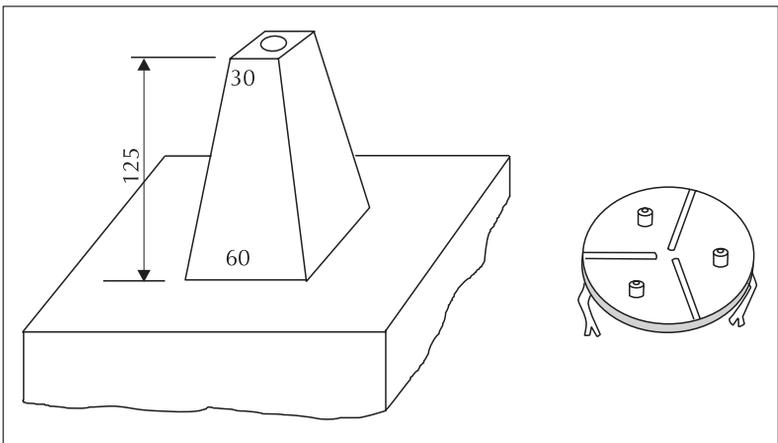


Figure 6. Pilier d'observation topographique et plaque de centrage.

b) Mesures d'alignement

Pour les petits barrages de type poids, il n'est pas nécessaire de faire appel à des dispositifs complexes de mesures topographiques en trois dimensions. On se satisfait de mesures dans les seules directions amont-aval et verticale.

Des réglottes sont scellées sur le couronnement du barrage dans le sens amont-aval. Elles sont alignées dans le sens de rive à rive, à raison de une par plot ou une tous les 10 à 15 m. Les piliers d'observation du type décrit plus haut (figure 6) sont implantés sur les rives, également dans ce même alignement. Ces piliers matérialisent donc une ligne fixe par rapport à laquelle on effectue une lecture sur les réglottes scellées, afin d'obtenir les déplacements dans le sens amont-aval. Les mêmes repères et piliers peuvent également servir au nivellement afin de contrôler les tassements.

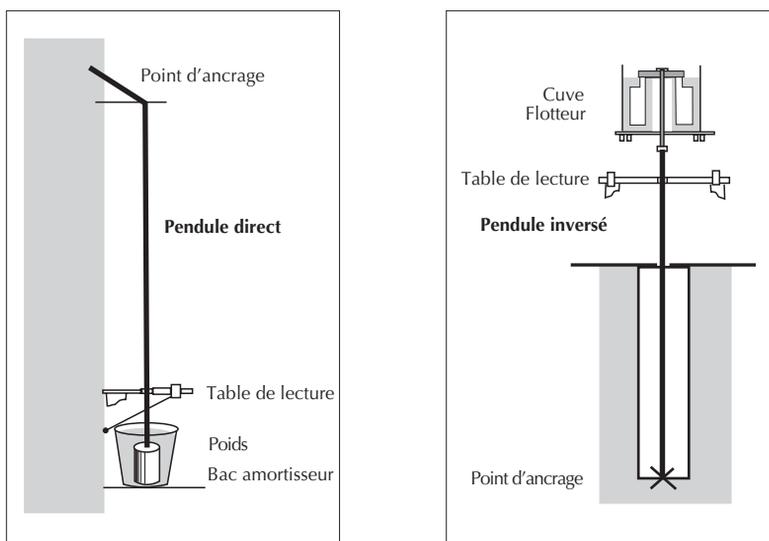
La précision des mesures d'alignement est de l'ordre du millimètre, parfois meilleure.

c) Planimétrie

Il s'agit d'une mesure par triangulation à partir de piliers situés autour de l'ouvrage. Ces mesures exigent une très grande technicité du topographe (utilisation de méthodes de compensation d'erreurs et calcul des ellipses d'incertitude) et sont, à ce titre, peu adaptées aux petits barrages, d'autant que l'incertitude des mesures, de l'ordre du millimètre dans les situations favorables, peut atteindre plusieurs millimètres pour des vallées larges. En résumé, nous ne recommandons pas ce type de dispositif pour les petits barrages.

d) Pendule

Le principe du pendule est celui du fil à plomb (figure 7) : le fil est scellé à une de ses extrémités et passe à l'autre extrémité devant une table de mesure fixée sur le barrage. Selon que le point de scellement du fil est situé en partie



haute ou en partie basse, on parle de pendule direct ou de pendule inversé (photo 10). Pour le pendule direct, la mise en tension du fil est assurée par un poids, tandis qu'elle est assurée par un flotteur pour le pendule inversé. La table de lecture, dite « à pointes de visées », assure une précision de l'ordre de 1/10 mm. Le pendule présente toutes les qualités exigées des appareils d'auscultation ; on peut effectuer des lectures fréquentes, en toutes saisons. Les pendules sont, en pratique, réservés aux barrages en béton ou maçonnerie. Ils peuvent être installés sur des ouvrages existants où ils remplacent alors avantageusement les mesures topographiques. Le pendule est un instrument dont la mesure est facilement automatisable, mais dans ce cas, il est toujours recommandé de conserver des mesures manuelles aux fins de vérification.

e) Élongamètre (ou extensomètre à base longue)

Ce dispositif permet de mesurer les variations de longueur d'une base matérialisée par un fil Invar ou une tige métallique ou en fibre de verre. Le fil (ou la tige) est scellé au fond d'un forage, en un point suffisamment éloigné du barrage pour être considéré comme fixe. À l'autre extrémité, on mesure les variations de longueur du fil ou de la tige par rapport à une plaque de référence solidaire du béton ou de la maçonnerie du barrage. La mesure est faite au comparateur avec une précision de quelques centièmes de millimètres. On peut également utiliser des capteurs électriques pour autant que l'on dispose d'une alimentation en énergie. Les applications principales pour les petits barrages en béton ou maçonnerie sont :

- mesure, en galerie, du déplacement amont-aval du pied du barrage (forage subhorizontal), figure 8a ;
- *idem*, mais depuis le parement aval, figure 8b.

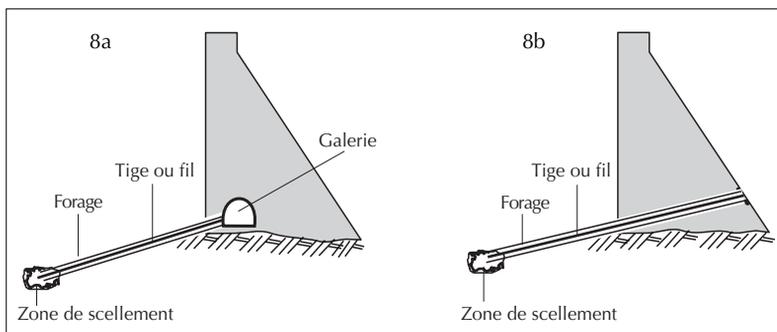


Figure 8. Schémas d'implantation d'un élongamètre.

Mesures de déformation

Selon que l'on mesure le déplacement relatif dans une ou dans trois directions, on distingue les fissuromètres ou les vinchons.

Fissuromètres

Ces appareils sont installés sur un joint ou sur une fissure dont on veut suivre les évolutions. On mesure les déplacements relatifs des deux lèvres du joint

ou de la fissure, en général dans l'axe perpendiculaire au plan de joint (ouverture du joint). Dans cette famille, il existe toute une gamme d'appareils du plus simple au plus sophistiqué :

- le témoin de fissuration fournit seulement une information en tout ou rien : la fissure continue à jouer ou est désormais inactive. En plâtre, résine ou mortier, le témoin doit être parfaitement bien scellé, et être conçu pour se rompre au droit de la fissure (section rétrécie) ;
- le fissuromètre avec mesure au vernier (mesure au $1/10^{\text{e}}$ de mm) ;
- le fissuromètre avec mesure au comparateur (mesure au $1/100^{\text{e}}$ de mm) ;
- le fissuromètre avec capteur inductif (mesure au moins au $1/100^{\text{e}}$ de mm mais nécessité d'une alimentation en énergie).

Vinchons

Le vinchon (figure 9 et photo 9) permet de suivre les mouvements relatifs dans les trois directions (ouverture, rejet et glissement). Le vinchon est constitué de deux pièces métalliques scellées de part et d'autre du joint ou de la fissure qu'il ausculte. La section des pièces métalliques doit être au minimum de 2 cm x 2 cm.

La mesure se fait au pied à coulisse avec une précision de lecture du $1/100^{\text{e}}$ de mm. Cependant, compte tenu d'autres sources d'erreurs, la précision de la mesure est d'environ 0,05 mm. La qualité globale de la mesure dépend largement du soin apporté au scellement de l'appareil et de la rigidité des pièces métalliques : un vinchon « bricolé » n'est d'aucune utilité.

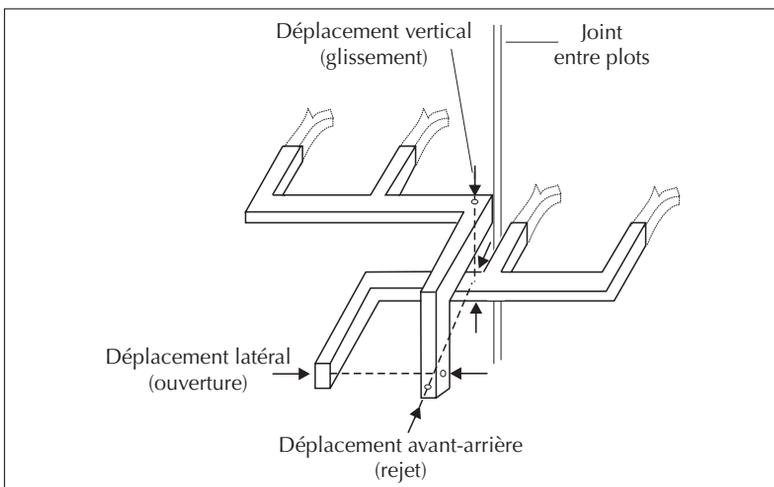


Figure 9. Vinchon.

Repérage des instruments d'auscultation

Tous les instruments d'auscultation doivent être clairement identifiés, par exemple à la peinture, de façon à éliminer toute possibilité de confusion entre deux instruments. L'identification des instruments se fait en général au moyen d'une lettre désignant le type d'instrument (D pour drain, P pour piézomètre, C pour cellule de pression, R pour repère de nivellement, V pour vinchon...)

suiwi d'un numéro d'ordre établi si possible logiquement (par exemple de la rive gauche à la rive droite, de l'amont à l'aval, du haut vers le bas).

L'implantation précise des instruments doit être reportée sur plan(s) et tous les renseignements nécessaires pour chaque instrument doivent figurer sur fiches :

- date d'installation, logs de forages le cas échéant ;
- incidents rencontrés pendant la vie de l'instrument, opérations de maintenance ;
- cote de l'exutoire des drains et zone de captage ;
- cote de tête, cote de fond, hauteur crépinée, diamètre des piézomètres ;
- cote de pose des cellules ;
- mesure initiale des vinchons ;
- etc.

Dispositif d'auscultation selon les types de barrages

Il est bien entendu impossible de donner des règles strictes pour la conception des dispositifs d'auscultation des petits barrages. Ce qui suit doit être considéré comme des recommandations, à adapter au cas particulier que constitue chaque ouvrage.

Pour un barrage neuf, le dispositif d'auscultation doit être prévu dès l'avant-projet et mis en place pendant la construction. Il a vocation à évoluer, certains appareils pouvant être abandonnés délibérément au bout de plusieurs années et d'autres pouvant être ajoutés en cas de désordre révélé notamment par l'observation visuelle. Des instruments peuvent aussi être installés sur des barrages anciens qui n'en ont pas été pourvus à l'origine.

Dans tous les cas, le dispositif d'auscultation d'un barrage doit être conçu en se posant les deux questions suivantes :

- quels sont les mécanismes potentiels de vieillissement de l'ouvrage ?
- par quelles grandeurs physiques se traduisent ces mécanismes et comment les mesurer ?

Le dispositif d'auscultation est d'autant plus complet que le barrage est de grande dimension et que l'aménagement représente un enjeu important aux plans de la sécurité et économique.

Le dispositif d'auscultation des petits barrages en terre

Les principaux phénomènes susceptibles de conduire à des désordres, voire à des ruptures, sont globalement de quatre types :

- des tassements de la crête du remblai entraînant une diminution de la revanche¹², ce qui limite la sécurité du barrage vis-à-vis du risque de surverse ;

12. Revanche : différence entre la cote de la crête et la cote des plus hautes eaux (cote de la retenue atteinte lors de la crue de projet).

- des pressions interstitielles excessives apparaissant lors de la construction du remblai ou lors de la première mise en eau, et qui peuvent remettre en cause les hypothèses adoptées lors du projet pour justifier la stabilité ;
- un colmatage du système de drainage entraînant une montée de la piézométrie, qui peut, à terme, atteindre le talus aval et mettre en danger la stabilité du remblai ;
- l’existence de circulations d’eau à travers le remblai ou la fondation, non contrôlées par le système de filtration et de drainage, et pouvant, par leur aggravation progressive, conduire à de l’érosion interne et à un mécanisme de renard.

Les *tassements* sont contrôlés à l’aide d’un dispositif topographique constitué de bornes de nivellement placées en crête de remblai (et éventuellement sur la risberme aval) tous les 20 à 30 m dans le sens de rive à rive, et de piliers d’observation placés sur les rives dans des zones non susceptibles d’être affectées par des mouvements (cf. § Mesure des déplacements). Les leviers topographiques sont faits en altimétrie uniquement, à l’aide d’un niveau.

La *piézométrie* est observée soit par des piézomètres, soit par des cellules de pression interstitielle (cf. § Mesure de la piézométrie). Un dispositif idéal comprend, d’une part, des profils amont-aval équipés de cellules¹³ permettant l’interprétation physique de l’évolution de la saturation et, d’autre part, un profil rive à rive sur le parement ou la risberme aval équipé de piézomètres à crépines longues dont le rôle est de détecter plus sûrement l’apparition d’une zone de fuite.

Si le barrage est doté d’un système de drainage des fondations, il convient d’en contrôler l’efficacité par des cellules ou des piézomètres, disposés de part et d’autre du système de drainage.

Les *débits de drainage et fuites* sont contrôlés par des dispositifs simples de mesure des débits (cf. § Mesure des débits). Les drains du barrage débouchent dans un collecteur aménagé à cet effet. Il peut être intéressant de séparer les zones de mesure pour faciliter l’analyse des résultats (rive droite-rive gauche, voire seuils de mesure intermédiaires pour des barrages de grande longueur). De même, les éventuels puits de décompression en pied aval d’un barrage en terre doivent si possible être équipés pour mesurer les débits interceptés. En cas d’augmentation anormale de débit, des mesures de teneurs en éléments fins peuvent renseigner sur un mécanisme éventuel d’érosion interne. Dans cette optique, la conservation d’un échantillon témoin des matériaux constitutifs du drain est donc préconisée, afin de pouvoir le comparer avec les éventuels dépôts aux exutoires des drains.

Le tableau 1 donne quelques recommandations sur le dispositif d’auscultation suivant la hauteur de remblai mesurée par rapport au terrain naturel. Les limites entre catégories n’ont qu’une valeur indicative. L’observation de désordres ou de phénomènes inquiétants conduira, dans la plupart des cas, à renforcer ponctuellement le dispositif d’auscultation au-delà des indications du tableau 1.

13. Pour les barrages zonés, on disposera des cellules dans le noyau et en aval du drain.

TABLEAU 1 — Dispositif d'auscultation recommandé pour un petit barrage en terre¹⁴

MESURES À PRÉVOIR	IMPORTANCE DU BARRAGE			
	$H < 5 \text{ m}$ et $H^2\sqrt{V} < 5$	$5 \text{ m} < H < 10 \text{ m}$ ou $5 < H^2\sqrt{V} < 50$	$10 \text{ m} < H < 15 \text{ m}$ ou $50 < H^2\sqrt{V} < 200$	$15 \text{ m} < H < 20 \text{ m}$ ou $H^2\sqrt{V} > 200$
Cote du plan d'eau	non	Limnimètre	Limnimètre	Limnimètre
Mesures topographiques	non	en général non nécessaires	Mesure des tassements par bornes de nivellement (barrages neufs uniquement)	Mesure des tassements et des déplacements amont-aval (nivellement et alignement)
Mesure de la piézométrie	non	en général non nécessaire, sauf surveillance de zones humides apparaissant sur le talus aval ou en pied de barrage	– un profil de rive à rive en haut du parement aval ou sur la risberme, équipé de piézomètres à crépine longue – quelques piézomètres en pied aval du barrage	– un ou quelques profils amont-aval équipés de cellules de pression de part et d'autre du noyau et du drain (si barrage zoné), et en fondation – un profil rive à rive sur la risberme, équipé de piézomètres à crépine longue – quelques piézomètres en pied aval du barrage et sur les rives en aval du voile d'étanchéité
Mesures des débits	en cas de débits significatifs	une mesure globale des débits collectés par le fossé de pied (scindée éventuellement en RD-RG)	mesures globales des débits RD-RG ; de préférence, mesures individuelles aux exutoires des drains	– mesures globales des débits RD-RG scindées éventuellement par zones – mesures individuelles aux exutoires des drains

14. Barrage dont l'étanchéité est assurée par le remblai. Pour les barrages à masque amont, se reporter au § suivant.

Le cas particulier des barrages en terre anciens

L'auscultation des barrages anciens peut être adaptée par rapport à celle que l'on prévoirait sur un barrage neuf.

Ainsi, après quelques années de service, on peut considérer qu'un barrage de faible ou moyenne hauteur ne tasse plus. Il est donc, sauf cas particuliers, inutile de doter un barrage ancien d'une auscultation topographique.

De même, si des mesures piézométriques paraissent nécessaires, on s'oriente de préférence vers la pose de piézomètres à crépine longue, implantés sur un profil de rive à rive sur le haut du talus aval ou sur la risberme, ou au pied aval.

Dans tous les cas, *on privilégie la mesure des débits*, car c'est une mesure globale renseignant sur l'ensemble du barrage.

Bien évidemment, en cas de désordre constaté sur l'ouvrage, on oriente le dispositif d'auscultation en vue d'un suivi fin des évolutions (piézomètres autour d'une zone humide, débit d'une fuite localisée...).

Le dispositif d'auscultation des petits barrages à masque amont

Nous considérons dans cette catégorie tous les barrages en remblai (généralement en enrochements ou en tout-venant) dont la fonction d'étanchéité est assurée par un organe mince en parement amont : masque en béton ou béton bitumineux, dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG). Les barrages ou bassins pour lesquels ce dispositif d'étanchéité se poursuit sous toute la cuvette, sont également inclus dans cette catégorie : cas des retenues collinaires pour l'irrigation ou des retenues d'altitude¹⁵ pour la production de neige artificielle.

Les masques en béton ont en général une épaisseur supérieure à 10 cm, ce qui leur confère une résistance mécanique qui permet de se dispenser d'une protection. Un DEG comporte par contre une protection mécanique de la membrane ; cependant, pour des raisons d'économie, cette protection n'est bien souvent pas mise en place sur les petits barrages. Si cela permet l'inspection visuelle et facilite la réparation de la membrane, *a contrario* le risque de défaillance de l'étanchéité est beaucoup plus élevé, en particulier pour les retenues d'altitude où aux risques liés aux corps flottants et au vandalisme s'ajoutent les risques liés aux chutes de blocs et à la glace. Une membrane non protégée est également exposée au risque de soulèvement par le vent.

La défaillance de l'organe d'étanchéité peut conduire à la rupture de l'ouvrage. Cette défaillance est d'autant plus probable que la membrane n'est pas protégée et que le barrage est dans un environnement hostile. De ce fait, *le contrôle des débits des drains est primordial*. Le dispositif de drainage doit être réfléchi dès les premières phases de conception de l'aménagement avec, si nécessaire, un compartimentage selon la zone et selon l'origine des débits

15. Les particularités de l'auscultation des barrages liées à l'altitude ne sont pas détaillées dans ce document. On pense en particulier aux problèmes d'accessibilité aux ouvrages ainsi qu'aux problèmes de neige et de gel qui pourront gêner l'inspection visuelle et perturber le fonctionnement des appareils d'auscultation.

TABEAU 2 — Dispositif d'auscultation recommandé pour un petit barrage à masque amont¹⁶

MESURES À PRÉVOIR	IMPORTANCE DU BARRAGE			
	H < 5 m et $H^2/V < 5$	5 m < H < 10 m ou $5 < H^2/V < 50$	10 m < H < 15 m ou $50 < H^2/V < 200$	15 m < H < 20 m ou $H^2/V > 200$
Cote du plan d'eau	non	Limnimètre	Limnimètre	Limnimètre
Mesures topographiques	non	non	– en général non nécessaires si remblai en enrochements – bornes de nivellement si remblai en terre ou tout-venant (barrages neufs uniquement)	mesure des tassements par bornes de nivellement
Mesure de la piézométrie	non	en général non nécessaire, sauf surveillance de zones humides apparaissant à l'aval ou sur les rives	– un profil de rive à rive sur la crête ou sur la risberme, équipé de piézomètres à crépine longue – quelques piézomètres en pied aval du barrage et/ou sur les rives	– un ou quelques profils amont-aval équipés de cellules de pression dans le remblai et en fondation, en aval de l'étanchéité – un profil rive à rive sur la crête ou sur la risberme, équipé, tous les 20 à 30 m, de piézomètres à crépine longue – quelques piézomètres en pied aval du barrage et sur les rives
Mesures des débits	– en cas de géomembrane non protégée, une mesure globale des débits à l'exutoire du système de drainage – dans les autres cas, mesure si débits significatifs	– une mesure globale des débits à l'exutoire du système de drainage – en cas de géomembrane non protégée, compartimentage du dispositif	mesure des débits à chacun des exutoires du système de drainage	– mesure des débits à chacun des exutoires du système de drainage – éventuellement mesure globale des débits collectés par le fossé de pied aval

16. Entrent dans cette catégorie tous les barrages en remblai dont la fonction d'étanchéité est assurée par un masque amont (béton, béton bitumineux ou géomembrane). Sont également inclus les barrages dont l'étanchéité de la cuvette est assurée par le même dispositif que le masque amont.

(sources sous la cuvette, fuites à travers le dispositif d'étanchéité, zonage géographique). Le compartimentage du dispositif de drainage est particulièrement recommandé en cas de géomembrane protégée (donc soustraite à l'inspection visuelle).

Le contrôle de la piézométrie en aval de l'étanchéité est à considérer comme un indicateur de seconde ligne, susceptible de renseigner sur une défaillance ou une saturation de la capacité du dispositif de drainage, pour autant que les piézomètres soient judicieusement localisés.

Le tassement du corps de remblai est limité si ce dernier est réalisé en enrochements, pour autant, bien sûr, que le compactage des matériaux ait été réalisé avec des engins appropriés (rouleaux vibrants lourds). Dans le cas d'un barrage en enrochements de moins de 20 m de hauteur construit sur une fondation non compressible, on peut considérer qu'il est inutile de prévoir des mesures de tassement. Par contre, pour les remblais en terre, les mesures de tassements sont recommandées pour les barrages de plus de 10 à 15 m de hauteur, au moins les premières années.

Les recommandations sur le dispositif d'auscultation figurent dans le tableau 2.

Le dispositif d'auscultation des petits barrages poids en maçonnerie ou en béton

Construits en règle générale sur des fondations rocheuses, ces barrages sont surtout sensibles aux phénomènes suivants classés par ordre de gravité décroissante :

- passage d'une crue causant une élévation du plan d'eau dont la poussée compromettrait la stabilité d'ensemble du barrage, ou causant une surverse avec érosion de la fondation en pied aval et diminution de la résistance au cisaillement ;
- occurrence régulière de crues sollicitant de façon importante l'ouvrage (fissurations et/ou phénomènes de fatigue) ;
- colmatage des drains de fondation ou du corps de barrage (s'ils existent) entraînant une augmentation des sous-pressions et diminuant la stabilité ;
- dégradation de la maçonnerie du corps de l'ouvrage ou dissolution du voile d'injection de la fondation, par entraînement de liant par les percolations d'eaux agressives ; ce phénomène a tendance à s'auto-accélérer, causant une augmentation des débits de fuites et des sous-pressions dans le corps du barrage ou en fondation ;
- dégradations au niveau des éventuels joints entre plots avec augmentation des fuites ;
- séisme.

Le passage des crues peut conduire à des sollicitations entraînant l'ouvrage hors du domaine élastique et provoquant des fissurations. Sous l'effet des sollicitations répétées, des phénomènes de fatigue peuvent être également observés sur les matériaux conduisant, là aussi, à des fissurations. Dans les cas extrêmes, on peut enregistrer des déplacements brutaux et irréversibles. La mesure des *déplacements* en crête est donc importante pour déceler tout comportement anormal de l'ouvrage sous fortes sollicitations. Elle se fait sur

TABEAU 3 — Dispositif d'auscultation recommandé pour un petit barrage poids

MÉSURES À PRÉVOIR	IMPORTANCE DU BARRAGE			
	$H < 5 \text{ m}$ et $H^2\sqrt{V} < 5$	$5 \text{ m} < H < 10 \text{ m}$ ou $5 < H^2\sqrt{V} < 50$	$10 \text{ m} < H < 15 \text{ m}$ ou $50 < H^2\sqrt{V} < 200$	$15 \text{ m} < H < 20 \text{ m}$ ou $H^2\sqrt{V} > 200$
Cote du plan d'eau	non	Limnimètre	Limnimètre	Limnimètre
Mesures topographiques	non	– non indispensable – le cas échéant, mesures d'alignement sur le couronnement (un point par plot)	– mesures d'alignement sur le couronnement à raison d'un point par plot – éventuellement vinchons en partie haute aux joints entre plots	– mesures d'alignement (et éventuellement de nivellement) sur le couronnement à raison d'un point par plot – vinchons en partie haute aux joints entre plots – si possible, pendule sur le plot de plus grande hauteur – éventuellement élongamètres subhorizontaux débouchant en galerie
Mesure de la piézométrie	non	non indispensable	– quelques piézomètres forés en galerie ou depuis le pied aval du barrage ou – cellules de pression au contact fondation-barrage – barrage	– piézomètres forés en galerie ou depuis le pied aval du barrage – cellules de pression au contact fondation-barrage – quelques piézomètres sur les rives en aval du barrage
Mesures des débits	non	une mesure globale du débit en pied aval	– mesure globale du débit en pied aval et en sortie de galerie, éventuellement scindée RD-RG – mesure individuelle des drains débitant significativement	– mesure globale du débit en pied aval et en sortie de galerie, scindée RD-RG – mesure individuelle des drains débitant significativement

les grands et moyens barrages au moyen de pendules et, sur les ouvrages plus modestes, au moyen de mesures d'alignement. On peut également suivre l'ouverture d'éventuelles fissures en pied amont grâce à des extensomètres débouchant en galerie. Les mouvements différentiels entre plots se mesurent au moyen de fissuromètres et, de préférence, au moyen de vinchons.

Les *sous-pressions* à la base du barrage sont contrôlées par des piézomètres ou des cellules de pression qui auscultent le contact fondation-barrage ; pour des considérations de maintenance, on préférera les premiers aux seconds.

Les *drains de fondation*, s'ils existent, doivent être équipés de façon à pouvoir mesurer leur débit. On peut aussi mesurer le niveau d'eau dans les drains ne débitant pas, sans pour autant que ces appareils puissent être réellement considérés comme des piézomètres.

La dégradation de la maçonnerie, la dissolution du voile d'injection et les dégradations au niveau des joints s'apprécient par la mesure des *débits de fuites*, localement au droit d'une venue d'eau identifiée, ou globalement par des seuils de mesure dans un caniveau en galerie ou en pied aval.

Les recommandations sur le dispositif d'auscultation des barrages poids sont résumées dans le tableau 3.

Cas particulier des vieux barrages poids non auscultés

Les phénomènes de vieillissement sur les vieux barrages poids se manifestent essentiellement par des évolutions des sous-pressions et des débits de fuite. C'est donc ces deux éléments que l'on s'attachera à suivre sur les barrages anciens en les équipant de :

- mesure des débits de fuite (globale ou fractionnée par zones) ;
- mesure de la piézométrie au contact entre le corps du barrage et la fondation.

La réalisation d'un dispositif de mesure des débits est en général facile et peu coûteuse (fossé de collecte en pied aval et seuil de mesure). Par contre, la mesure de la piézométrie nécessite la réalisation de forages, destructifs ou carottés, suivant que l'on souhaite ou non pratiquer à cette occasion une reconnaissance précise de l'état de la maçonnerie et de la fondation.

L'installation d'un dispositif de mesure des déplacements d'un vieux barrage poids n'est en général justifiée qu'à partir d'une vingtaine de mètres de hauteur. Chaque fois que cela est possible, on installe un ou quelques pendules. Sinon, il s'agit de mesures d'alignement.

Le dispositif d'auscultation des petits barrages voûte en béton

Peu de petits barrages sont des voûtes. Toutefois, il existe quelques voûtes à simple courbure de moins de 20 m de hauteur, ainsi que des barrages multivoûtes constitués de coques minces cylindriques appuyées sur des contreforts.

On s'attache à suivre les mouvements de ces ouvrages minces, donc relativement déformables. Les inconvénients déjà décrits des mesures topographiques (faible périodicité des mesures, haute technicité de l'opérateur pour

TABLEAU 4 — Dispositif d'auscultation recommandé pour un petit barrage voûte

MESURES À PRÉVOIR	IMPORTANCE DU BARRAGE			
	H < 5 m et $H^2\sqrt{V} < 5$	5 m < H < 10 m ou $5 < H^2\sqrt{V} < 50$	10 m < H < 15 m ou $50 < H^2\sqrt{V} < 200$	15 m < H < 20 m ou $H^2\sqrt{V} > 200$
Cote du plan d'eau	non	Limnimètre	Limnimètre	Limnimètre
Mesures topographiques	non	non indispensable	– si possible pendule en clé de voûte ou – mesure d'alignement sur le couronnement d'un point en clé de voûte	– pendule en clé de voûte et éventuellement en rives ou – topographie par planimétrie de repères scellés sur le parement aval
Mesure de la piézométrie	non	non indispensable	– quelques piézomètres en rives et en pied aval du barrage	– piézomètres en rives et en pied aval du barrage
Mesures des débits	non	une mesure globale du débit en pied aval	– mesure globale du débit en pied aval, éventuellement scindée RD-RG	– mesure globale du débit en pied aval, scindée RD-RG – mesure individuelle des drains débitant significativement

faire de la planimétrie) font que l'on réserve ces dispositifs aux barrages à voûtes multiples que l'on équipe de mesures d'alignement et de nivellement en tête des contreforts.

On préfère désormais installer *un ou quelques pendules*, appareils simples, précis et faciles à mesurer. Dans le cas des voûtes simples, un pendule est installé en clé de voûte¹⁷, complété, le cas échéant, par des pendules en rives. Dans le cas des voûtes multiples, on installe un (plusieurs) pendule(s) sur le(s) contrefort(s) de plus grande hauteur.

Pour les barrages voûtes, *la piézométrie* au contact entre le béton et la fondation n'est pas un facteur de sécurité aussi important que pour des barrages poids. Par contre, il convient de suivre attentivement la piézométrie dans les appuis et en fondation. Cela se fait au moyen de piézomètres ouverts, implantés en fonction de la structure géologique.

Dans tous les cas, *le contrôle du débit total* des éventuelles fuites constitue un bon indicateur du comportement du barrage.

17. Selon la configuration du barrage, le pendule de clé de voûte est installé dans un forage à travers le béton ou dans un tube scellé sur le parement aval.

Mais plus encore que pour les autres types de barrages, c'est l'*observation visuelle* attentive qui est la base de la surveillance de ces ouvrages. De ce point de vue, la constitution périodique de dossiers photographiques apporte une aide très précieuse.

Périodicité des mesures d'auscultation

Nous avons indiqué plus haut que la périodicité des inspections visuelles devait être *mensuelle à bimestrielle* en phase d'exploitation normale et en l'absence de tout indice inquiétant quant au comportement de l'ouvrage. C'est à l'occasion de ces visites d'inspection qu'il convient de procéder aux mesures simples d'auscultation :

- cote du plan d'eau ;
- débit des drains ;
- piézomètres et des cellules de pression interstitielle ;
- vinchons ;
- pendules, le cas échéant.

En résumé, la périodicité de ces mesures dépendra de trois facteurs :

- la position du barrage dans son cycle de vie : première mise en eau¹⁸, exploitation normale, vidange pour inspection, etc. ;
- son niveau de remplissage ;
- l'apparition de phénomènes inquiétants.

L'ingénieur spécialiste chargé du suivi de l'ouvrage devra fournir toutes les recommandations permettant d'adapter le rythme des mesures au comportement du barrage et à sa situation d'exploitation. Pour les barrages intéressant la sécurité publique, le dispositif d'auscultation et ses évolutions doivent être soumis au service de contrôle.

En phase d'exploitation, il est recommandé, dans tous les cas, de procéder au moins **à une mesure par mois pour tous les appareils dont la lecture est simple**¹⁹. Ce rythme est un minimum pour permettre une analyse des mesures et apprécier les dérives éventuelles. Le rythme bimensuel peut être recommandé au jeune âge ou lorsque le barrage est proche de son niveau maximum de remplissage.

L'agent d'exploitation doit reporter l'ensemble des mesures d'auscultation sur une feuille préétablie telle que celle présentée figure 10. Un plan

18. La première mise en eau représente, de ce point de vue, un cas particulier qui sort un peu du cadre du présent document. En effet, la première mise en eau doit se faire sous la responsabilité du maître d'œuvre et être expressément incluse dans sa mission. Un protocole de premier remplissage doit être établi, en prévoyant en particulier :

- le mode de contrôle de la montée du plan d'eau ;
- le rythme de montée de l'eau (ne pas dépasser 1 m/jour et si possible 0,5 m/jour) ;
- un éventuel palier intermédiaire d'une semaine environ aux 2/3 du remplissage ;
- le rythme des inspections et mesures d'auscultation (à priori bihebdomadaire) ;
- les personnes à alerter en cas de phénomène inquiétant.

19. Cette recommandation n'est pas contradictoire avec le rythme bimestriel préconisé pour l'inspection des plus petits barrages, car ces derniers ne sont en général pas équipés d'instruments d'auscultation.

d'implantation des différents dispositifs de mesure doit accompagner la feuille de mesure, afin de faciliter le travail de l'agent d'exploitation, particulièrement pendant les périodes d'intérim.

Cas particulier des mesures topographiques

a) Lorsqu'un petit barrage en remblai est équipé de repères de tassement, il est recommandé de procéder à des levés trimestriels ou semestriels pendant la première année, puis de passer ensuite au rythme semestriel ou annuel. Même en cas de stabilisation apparente des tassements, il est recommandé de continuer les mesures (par exemple tous les deux à cinq ans) afin de vérifier que la revanche du barrage n'est pas diminuée. En cas de détérioration partielle du dispositif topographique, on pourra se servir du niveau du seuil de l'évacuateur comme niveau de référence pour le nivellement de la crête du remblai.

BARRAGE DE :						
Propriétaire :			Exploitant :			
Date de la visite :			Visite et mesures faites par :			
Heure de début de visite :			Conditions météo :			
Inspection visuelle	(Signaler surtout les faits nouveaux ou les évolutions depuis la précédente visite)					
<ul style="list-style-type: none"> - Parement aval : - Parement amont : - Crête : - Déversoir : - Chambre des vannes : - Abords de l'ouvrage : - Points particuliers : 						
Mesures d'auscultation						
Débit des drains	Nom du drain	Capacité du récipient (l)	Temps de 1 ^{er} remplissage	Temps de 2 ^e remplissage	Moyenne (s)	Débit (l/s)
Remarques sur les appareils						
Cote des piézomètres	Nom du piézo	Cote de la tête (m NGF)	Cote du fond (m NGF)	Profondeur de l'eau (m)	Cote de l'eau (m NGF)	
Cellules de pression	Nom de la cellule	Cote de pose	No (Hz)	N (Hz)	Pression interstitielle (m c.e.)	Cote piézo (m NGF)
Vinchons	Nom du vinchon	x	y	z		

Figure 10. Exemple de fiche d'inspection d'un petit barrage.

b) Lorsqu'un barrage poids est équipé de dispositifs de nivellement et d'alignement, il est recommandé de procéder à une ou deux campagnes de mesure pendant le premier remplissage, puis de passer à un rythme biannuel à des périodes fixes dans l'année (retenue pleine/retenue basse). Ces mesures peuvent être faites par le personnel d'exploitation du barrage.

Après quelques années de comportement satisfaisant de l'ouvrage, le rythme des mesures pourra être encore allégé (une fois tous les deux à cinq ans). Dans certaines situations, les mesures pourront être suspendues, en particulier si on constate que les déplacements mesurés sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur ces mesures.

Interprétation des mesures d'auscultation

La vérification de la mesure

L'agent d'exploitation chargé de faire les mesures des instruments d'auscultation, doit vérifier chaque mesure. Cela consiste à comparer la mesure à la précédente, ainsi qu'à la plage habituelle de variation de l'instrument considéré. Ainsi, on identifie rapidement la plupart des erreurs de lecture, ainsi que les dysfonctionnements éventuels de l'appareil d'auscultation. On peut alors refaire la mesure sans délai et/ou vérifier le bon fonctionnement de l'appareil.

Une deuxième source d'erreur se présente à la fin de la tournée d'inspection lors de la retranscription des mesures sur fichier papier ou informatique. Une vérification attentive est nécessaire. Si l'exploitant dispose d'un matériel informatique, il peut directement visualiser sur graphique interannuel les variations des mesures de chaque instrument et ainsi identifier rapidement toute mesure anormale ou inquiétante.

Enfin, dans une troisième étape, l'ingénieur chargé de l'analyse des mesures doit s'attacher à identifier toute mesure « anormale » à partir du graphe des mesures brutes. L'ingénieur ne pourra éventuellement corriger ou éliminer une mesure jugée *a priori* anormale qu'après contact avec l'agent d'exploitation ayant fait les mesures.

L'analyse des mesures

Les variations des mesures relevées sur les barrages résultent d'une combinaison de facteurs le plus souvent difficiles à dissocier immédiatement, quels que soient la nature et le perfectionnement des instruments d'auscultation utilisés. Parmi tous les facteurs qui influencent le comportement d'un ouvrage, trois sont largement prépondérants :

- les conditions hydrostatiques (niveau d'eau dans la retenue) ;
- les conditions climatiques (température, pluie, nappe de versant) ;
- l'âge du barrage.

Si les sollicitations hydrostatiques et climatiques sont réversibles par nature, les effets du facteur « temps » traduisent, au contraire, le caractère irréversible ou évolutif des phénomènes observés. Les variations des sollicitations

réversibles sont évidemment intéressantes à connaître, ne serait-ce que pour vérifier *a posteriori* les prévisions de calculs. Elles ne doivent pas, en principe, être de nature à mettre en cause la sécurité de l'ouvrage puisqu'il aura été normalement dimensionné pour pouvoir y résister.

Une véritable analyse de l'ouvrage suppose donc que l'on puisse suivre l'évolution de son comportement dans le temps, déduction faite de toute autre variation. La première étape de l'analyse (et, dans le cas des petits barrages, souvent la seule) consiste à faire apparaître les mesures de chaque instrument sur un graphe adapté au phénomène à analyser : en général pluriannuel pour les grandeurs mécaniques, et en fonction de la cote de retenue pour les grandeurs hydrauliques. Ce premier niveau d'analyse peut être fait directement par l'exploitant, pour autant qu'il dispose d'outils informatiques type tableurs ou, ce qui est préférable, d'outils dédiés. Cela permet le plus souvent de déceler, au moins qualitativement, des variations irréversibles brutales et même lentes, en particulier lorsque les facteurs explicatifs sont peu nombreux (retenue à niveau quasi constant, mesures non soumises aux influences saisonnières...).

Ce niveau d'analyse s'avère toutefois insuffisant, en particulier pour les plus grands barrages, dès que l'on souhaite accéder à des valeurs numériques ou lorsque plusieurs facteurs explicatifs coexistent. On doit alors faire appel à des modèles statistiques, qui ne sont pas d'usage très courant pour les petits barrages et que nous décrivons donc succinctement à l'annexe II.

L'analyse de quelques phénomènes irréversibles

Nous ne traiterons ici que des cas simples pour lesquels une analyse qualitative permet de mettre en évidence les effets du facteur « temps ». Nous mentionnons les tendances qui, lorsqu'elles sont confirmées, doivent être considérées comme inquiétantes et donc conduire à prendre des dispositions appropriées, la première étant un renforcement de l'inspection visuelle et de l'auscultation.

a) Augmentation du niveau piézométrique sous un barrage poids

Souvent accompagnée d'une baisse des débits des drains, l'augmentation de la piézométrie se traduit par une augmentation des sous-pressions sous la fondation de l'ouvrage et en diminue la stabilité.

b) Augmentation du niveau piézométrique dans un remblai

Une telle évolution est inquiétante surtout si elle est constatée en aval du drain. Elle peut être le signe d'un contournement de ce drain (ou d'une alimentation par un versant). Dans tous les cas, la stabilité du remblai aval va s'en trouver diminuée. Si la ligne piézométrique vient affleurer le talus, cela se manifeste par des suintements qui peuvent s'accompagner d'érosion interne du remblai évoluant, dans certains cas, vers la formation d'un renard.

c) Augmentation des débits des drains

Que ce soit dans un barrage poids ou dans un barrage en remblai, l'augmentation des débits de drainage traduit le vieillissement de l'étanchéité. Le phénomène n'est vraiment inquiétant que s'il est rapide. Il convient d'essayer de diagnostiquer l'origine de l'évolution des débits en scindant si possible

les zones de mesure, afin d'orienter ensuite les actions de maintenance ou de réparation.

d) Baisse des débits des drains

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la baisse de débit d'un drain peut être plus inquiétante que son augmentation. En effet, une baisse de débit à conditions hydrostatiques et climatiques constantes peut avoir deux origines :

– une amélioration naturelle de l'étanchéité du barrage et de sa fondation par colmatage à l'amont de la porosité et des fissures ; ce cas est évidemment tout à fait favorable et rassurant ;

– un colmatage du dispositif de drainage qui se trouve peu à peu contourné et ne capte plus les débits de fuite. Dans ce cas très inquiétant, la piézométrie va augmenter et les écoulements non contrôlés peuvent être à l'origine de mécanismes d'érosion interne ou de glissements du talus aval pour un barrage en remblai.

Périodicité de l'analyse des mesures

Pour les barrages intéressant la sécurité publique, il est demandé au propriétaire (ou à son exploitant) de fournir un rapport annuel d'auscultation comportant, une année sur deux, une analyse statistique approfondie des mesures.

Pour les barrages où les enjeux de sécurité sont moindres, il est recommandé, selon l'importance de l'ouvrage, un rapport biennal ou triennal rédigé par l'ingénieur spécialiste, présentant les graphiques interannuels des mesures brutes et une analyse de leurs variations et éventuelles évolutions, ainsi que des éléments d'explication des phénomènes mesurés ou observés.

Entretien des petits barrages

Ce chapitre décrit les opérations d'entretien courant ou de petite maintenance qui doivent être menées par l'exploitant du barrage :

- contrôle de la végétation sur l'ouvrage et à ses abords ;
- entretien des parements en maçonnerie ;
- comblement des ravines sur le remblai ;
- réparation des fils rompus des gabions ;
- entretien du dispositif d'auscultation ;
- entretien des ouvrages hydrauliques (évacuateur, vidange).

Lorsque le propriétaire n'exploite pas directement l'ouvrage, le contrat qui le lie à l'exploitant doit expressément détailler les travaux d'entretien qui sont à la charge de l'exploitant.

On ne décrit pas dans ce document les opérations de grosse maintenance ou de réparation, qui doivent être réalisées dans le cadre d'une ingénierie qualifiée.

Contrôle de la végétation

La végétation arborée et arbustive

Par le réseau de racines qu'ils développent, les arbres et arbustes sont à proscrire sur les barrages (notamment en terre) et à leur proximité immédiate. Plusieurs conséquences néfastes sont à craindre :

- la gêne pour l'inspection visuelle ;
- le colmatage du système de drainage (collecteurs en particulier) par le système racinaire des arbustes en pied aval ;
- la création de zones de cheminement préférentielles pour l'eau le long des racines, en particulier après la mort de l'arbre, et les risques de développement de renards ;
- le soulèvement d'ouvrages rigides (par exemple l'évacuateur de crues) lors de la croissance des racines ;
- le développement d'un couvert propice à l'installation d'animaux fouisseurs.

La crête, les talus et les abords d'un barrage, jusqu'à une distance d'au moins 10 à 15 m du pied, doivent donc être exempts de tout arbre ou arbuste.

Que faire en cas d'arbustes ou d'arbres existants sur un barrage en terre ?

Bien que la situation d'un boisement inopportun des talus d'un barrage en terre puisse facilement être évitée grâce à un fauchage régulier, il faut reconnaître qu'elle est assez souvent rencontrée. Quelques années de négligence de contrôle de végétation suffisent, en effet, à entraîner une telle situation.

La complexité du traitement d'une végétation ligneuse indésirable croît avec l'ampleur de son développement :

– si la végétation est uniquement arbustive — avec des souches et, donc, des racines encore grêles et peu développées — on peut procéder à une coupe systématique des brins (sans dessouchage) qu'il convient d'accompagner de l'application d'un produit chimique dévitalisant sur les cicatrices fraîches, afin de tuer les sujets ;

– si la végétation est arborescente mais avec des arbres très épars, il est recommandé de les abattre, puis de prévoir dans les semaines qui suivent une opération de génie civil consistant à arracher les souches — à l'exception de celles à proximité de structures rigides afin de ne pas les endommager —, à élargir et taluter les excavations ainsi créées et à reconstituer le talus par apport et mise en œuvre de sol compacté, de caractéristiques appropriées ;

– si la végétation est arborescente et dense, un traitement sûr et efficace ne peut être envisagé que dans le cadre d'une grosse opération de confortement du barrage : création d'une coupure étanche dans le remblai (paroi moulée, rideau de palplanches, etc.) ou mise en œuvre d'une recharge compactée sur un ou les deux talus, après abattages, dessouchages, extraction des couches de terre végétale et réglage de talus.

Il faut être conscient que, dans ce dernier cas et tant que l'intervention « génie civil » n'aura pas eu lieu, le risque de désordres lié aux racines perdurera et même s'accroîtra, à long terme, avec la mort progressive et inéluctable des arbres. Aussi, durant le période de non-intervention, une surveillance renforcée du barrage s'impose, notamment de ses débits de fuite, et il est recommandé de procéder à un débroussaillage très régulier entre les arbres afin, au moins, de rétablir des conditions de visibilité correctes des talus.

Si le barrage est à masque amont, des traitements plus circonstanciés peuvent être appliqués, tout au moins pour la végétation du talus aval — son dessouchage n'étant plus nécessairement obligatoire.

La végétation herbacée

L'engazonnement du talus aval d'un barrage en remblai représente le meilleur compromis technico-économique pour la protection contre le ravinement des eaux de ruissellement. Cependant, cette végétation herbacée doit être régulièrement fauchée afin que le parement aval reste en permanence facilement observable. En outre, le passage régulier des engins mécaniques et la suppression des zones de couvert dissuadera les animaux fouisseurs d'élire domicile dans le barrage.

Il est recommandé de faucher (ou de tondre) les zones engazonnées au moins une fois, et si possible deux fois, par an (par exemple en fin de printemps et en début d'automne). Cet entretien doit s'étendre aux abords du barrage.

À cette occasion, on observe toutes les zones humides soulignées par une végétation particulière ou par une moindre portance du sol.

La contractualisation avec un éleveur qui fait paître son troupeau sur le parement aval et les abords du barrage est une pratique intéressante (moins de travail de fauche) mais qui ne dispense pas d'un nettoyage des végétaux délaissés par les animaux. Il faut cependant éviter le surpâturage.

Entretien de surface des maçonneries

Il est assez courant de voir de la végétation s'installer sur les parements en maçonnerie. Les anfractuosités des joints constituent des endroits propices au dépôt des poussières et des graines ; ces dernières y trouvent des conditions hygrométriques favorables à leur germination et leur développement.

L'action des racines est un facteur important de dégradation des joints et des enduits, voire dans les cas extrêmes, de désorganisation des pierres des parements. Il faut donc, là aussi, mener une lutte sans merci contre tout développement de végétation sur les maçonneries, en arrachant les plantes dès qu'elles apparaissent. Dans les parties les plus difficiles d'accès, on peut se contenter d'un arrachage annuel.

Le vieillissement des bétons et des maçonneries peut être lié à des phénomènes mécaniques ou physico-chimiques. Même si certains travaux de réparation peuvent être faits par l'exploitant, ces désordres nécessitent, en premier lieu, une évaluation de leur importance, un diagnostic puis un choix judicieux des techniques de réparation, toutes choses qui relèvent d'une expertise par un ingénieur spécialiste.

Il est *a priori* fortement déconseillé de rejointoyer la maçonnerie d'un parement aval de barrage sans avoir au préalable identifié et traité la cause de la dégradation. Sinon, on risque de contrarier le drainage naturel au travers du parement et de provoquer ainsi une montée des sous-pressions dans le corps du barrage. Une précaution consiste à réaliser des joints discontinus qui maintiennent cette fonction de drainage.

Comblement des ravines sur le talus d'un barrage en remblai

Causé par le ruissellement des eaux de pluie, le creusement de ravines est un phénomène qui tend à s'auto-entretenir car les ravines existantes deviennent des lignes de concentration des débits, lesquels ont d'autant plus de puissance pour continuer le creusement. Ce mécanisme est particulièrement marqué dans les premiers mois après la construction, lorsque la couche de terre végétale n'est pas encore consolidée et que la végétation herbacée ne s'est pas encore complètement implantée.

La réparation d'une ravine consiste non seulement à remblayer la ravine elle-même, mais également à éliminer la cause de la ravine. Sur un barrage en terre, c'est souvent à partir d'un point bas de la crête que, par concentration des débits, se creuse une ravine sur le talus. Parfois, c'est par contournement d'un ouvrage en béton ou bien par érosion dans une zone de remblai moins

bien compactée. Il ne faut donc pas hésiter à intervenir au-delà de la ravine elle-même.

L'erreur souvent commise dans le comblement d'une ravine consiste à la remblayer avec des pierres. Cette technique ne peut à elle seule constituer une réparation pérenne, car elle ne permet pas de stopper les écoulements ; ceux-ci vont continuer à éroder autour et sous les pierres qui vont progressivement être déstabilisées.

La réparation doit donc consister à (figure 11) :

- agrandir, dans un premier temps, la ravine afin de lui donner une forme régulière trapézoïdale ;
- installer un blocage de pied avec des pierres de dimension décroissante vers l'amont de la ravine ;
- puis remblayer avec du tout-venant par couches horizontales de 10 cm compactées à la dame ; afin de faciliter son compactage, le matériau doit être légèrement humide ;
- éliminer l'origine de la ravine : combler un éventuel point bas sur la crête du remblai, aménager un exutoire dans une zone de concentration des écoulements (cunette revêtue ou fossé).

En fin de réparation, la surface du parement du remblai doit avoir retrouvé une forme très régulière, ce qui devrait éviter que la ravine ne se reforme à côté de son emplacement initial, pour autant que l'on ait traité l'origine du désordre.

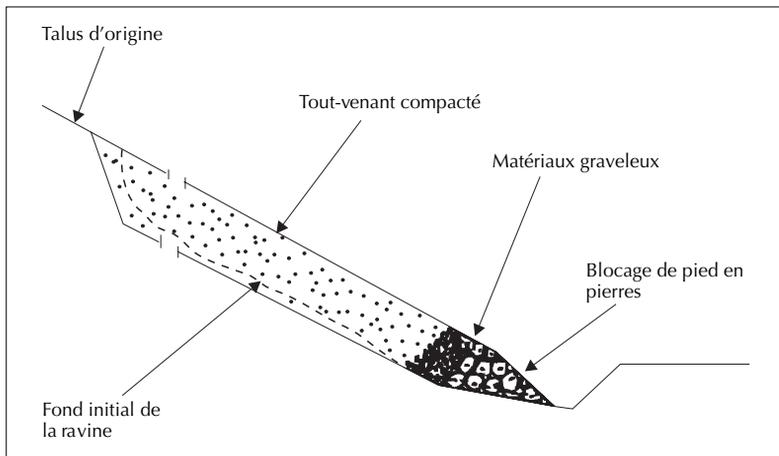


Figure 11. Principe de réparation d'une ravine (coupe longitudinale).

Prévention et traitement des dégâts des animaux fouisseurs

Les cas de dégradations importantes de fouisseurs sur les barrages en terre ne sont pas fréquents, mais les conséquences du creusement de gros terriers dans le remblai sont potentiellement graves :

- raccourcissement des lignes de fuite et risque d'apparition de percolation dans les galeries de terrier et de développement d'une érosion interne ;
- affaissements/irrégularités en crête ou sur les talus.

Les deux principales espèces à risques sont : le ragondin (très présent dans le Sud-Ouest) à proximité d'une ligne d'eau, le blaireau à tout niveau des talus.

Comme déjà indiqué, le fauchage ou le débroussaillage régulier, troublant la quiétude des lieux et empêchant le développement de zones de couvert, limite les risques d'installation d'une population de fousseurs.

En cas de dégradations graves constatées (terriers de gros diamètre récemment apparus), il convient en premier lieu de capturer voire d'éliminer l'animal, en respect des réglementations en vigueur (se renseigner auprès de la DDAF compétente), après l'avoir identifié.

Un talus dégradé par des terriers isolés peut être réparé par des travaux de petits terrassements, s'inspirant de ce qui est décrit plus haut pour les ravines. Si les dégradations sont très lourdes — cas fort rare heureusement —, il convient d'envisager des travaux importants de reconstitution de l'étanchéité du remblai (injections, paroi moulée, etc.), puis éventuellement d'installer des dispositifs dissuasifs (pose de grillage ou d'un revêtement sur les talus).

Réparations des désordres dus au batillage sur le talus amont

La pérennité du talus amont d'un barrage en terre nécessite une protection contre le batillage (action des vagues formées par le vent sur le plan d'eau).

La protection la plus courante est constituée d'une couche d'enrochements dimensionnée à l'aide des règles empiriques en fonction de la longueur du plan d'eau, de la force et de la direction du vent, de la pente du talus. Sur des barrages soumis à un faible marnage et à de petites vagues, des protections végétales peuvent être mises en place, à condition d'avoir un talus à pente douce et d'utiliser des espèces adaptées.

Sur les petits barrages, pour des raisons de coût, on choisit parfois de ne pas protéger le talus amont, ou bien on réalise cette protection avec des blocs de taille réduite, partiellement ou *a posteriori*, après avoir constaté un début de dégradation.

Il faut être conscient que l'absence ou le sous-dimensionnement de la couche de protection contre le batillage conduit presque toujours à des désordres plus ou moins rapides sur le parement amont. L'action des vagues déplace les pierres de poids insuffisant et creuse le remblai, aboutissant ainsi à la formation de marches d'escalier dans la zone de marnage. Cela peut conduire ensuite à des glissements localisés qui progressent peu à peu en diminuant à terme la largeur en crête du remblai.

Il convient donc d'intervenir rapidement lorsque l'on constate l'amorce des désordres :

- en cas de désordres localisés sur une protection en enrochements, il suffit de procéder à des réparations ponctuelles, en mettant en place des enrochements plus gros à la place de ceux qui ont été déplacés ;

– en cas de désordres généralisés sur un talus insuffisamment protégé, il faut mettre en place dans toute la zone du marnage une protection correctement dimensionnée. Dans un premier temps, on procède au reprofilage du talus amont avec création d'une petite risberme au pied de la zone à protéger. En prenant appui sur cette risberme, on met en place une couche de transition granulométrique²⁰, puis la couche supérieure de protection (figure 12).

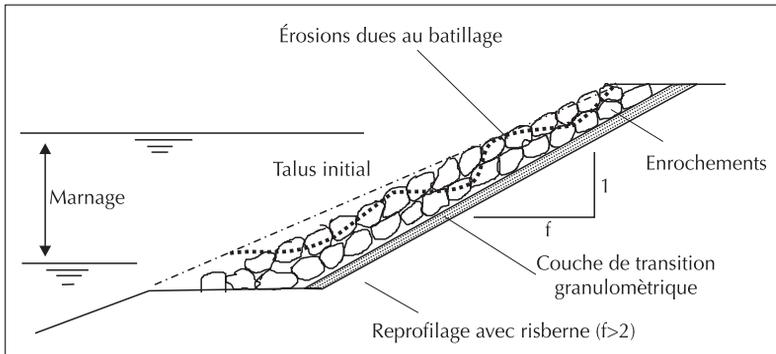


Figure 12. Réparation de désordres généralisés dus au batillage. 1. Talus initial ; 2. Reprofilage avec risberme ($f > 2$) ; 3. Couche de transition ; 4. Enrochements.

Réparation des fils rompus de gabions

Les structures en gabions sont parfois utilisées sur les petits barrages en terre : bajoyers du bassin de dissipation, soutènement en pied de talus, murette de revanche en crête de remblai, protection antibatillage sur le talus amont, etc. S'ils sont réalisés avec un grillage de bonne qualité et correctement mis en œuvre, les gabions peuvent avoir une durée de vie de trente à cinquante ans, voire plus. La dégradation la plus courante est la rupture des fils des cages. Deux mécanismes peuvent y conduire :

- une rupture localisée a souvent pour origine un choc ou un pliage du fil ayant fait s'écailler la galvanisation. Si elle est faite sans retard, la réparation d'une telle rupture est simple. Elle se fait par l'adjonction d'un fil galvanisé selon le procédé décrit à la figure 13 ;
- une corrosion généralisée peut se manifester par exemple au niveau des zones de marnage, entraînant alors des lignes entières de ruptures pouvant causer la vidange de la cage. La réparation doit être faite dès que l'on constate une corrosion généralisée et, en tout cas, avant qu'il n'y ait de multiples ruptures. Il faut doubler la nappe corrodée par une nouvelle nappe de grillage galvanisé qui lui est fixée sur tout le pourtour, et prévoir un revêtement au mortier ou par béton projeté des zones particulièrement exposées à la corrosion.

20. Le rôle de cette couche de transition est d'empêcher le soutirage des matériaux du remblai à travers les enrochements de protection, sous l'effet de l'action des vagues. La granulométrie de cette couche doit donc être intermédiaire entre celle du remblai et celle des enrochements. On la détermine par les règles de filtre (voir la documentation spécialisée, en particulier [CFG, 1997]).

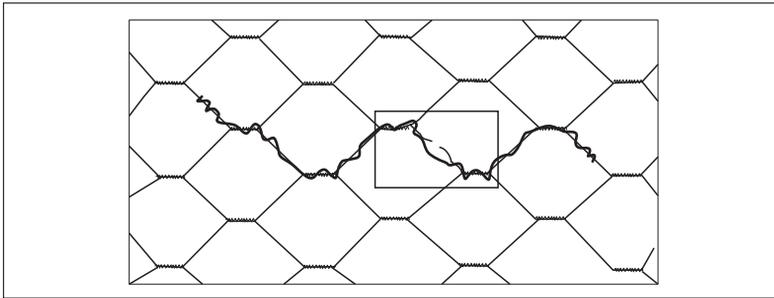


Figure 13. Procédé de réparation d'un fil coupé.

Entretien du dispositif d'auscultation

La vérification régulière du bon fonctionnement des appareils d'auscultation doit être faite par l'exploitant à l'occasion des mesures et par l'ingénieur spécialiste à l'occasion des visites approfondies.

On peut détailler les divers travaux d'entretien par type d'appareil :

- *drains forés en fondation* : élimination régulière de la calcite ou des divers dépôts susceptibles de se former en surface à l'exutoire des drains ; le cas échéant nettoyage interne du drain à l'hydrocreuseuse haute pression (à réserver aux drains forés dans le rocher sain ou dans le béton, à proscrire dans les drains crépinés) ;
- *drains et piézomètres crépinés dans un remblai* : vérification périodique du niveau du fond du drain et le cas échéant nettoyage par circulation d'eau à faible pression ou à l'air-lift ;
- *parties métalliques des protections de drains et piézomètres* : graissage des pas de vis et des cadenas, peinture des parties oxydables, numérotation ;
- *exutoires des drains et fossés de collecte des débits* : curage régulier, nettoyage de la végétation, contrôle des éventuels apports solides (examiner en particulier l'intérieur des tuyaux à leur exutoire), élimination des mousses et des algues qui se développent aux exutoires²¹, le cas échéant, réfection des revêtements ;
- *repères et bornes topographiques* : dégagement de la végétation, peinture ;
- *vinchons* : peinture des parties oxydables, mais sans peindre les rivets de mesure.

Entretien des ouvrages hydrauliques

Sous la dénomination « ouvrages hydrauliques » d'un barrage, on englobe :

- le(s) évacuateur(s) de crues ;
- la (les) prise(s) d'eau ;
- la vidange.

21. Aux exutoires, les eaux de drainage s'oxygènent au contact de l'air et souvent se développent des ferrobactéries qui se déposent et colmatent le dispositif. L'immersion d'une barre de cuivre peut être un moyen de ralentir ce phénomène [Fabre, 2003].

Ces organes sont parfois totalement indépendants, mais souvent, et en particulier sur les petits barrages, ils peuvent être partiellement confondus (par exemple une conduite unique sert à la fois pour la prise d'eau et la vidange).

Évacuateur(s) de crues

Outre l'observation de routine lors des visites périodiques, les évacuateurs de crues doivent faire l'objet d'un examen visuel particulièrement attentif après chaque crue (voir liste des points à observer en annexe I.A).

Dans la très grande majorité des cas, les petits barrages sont équipés d'évacuateurs à seuil libre (c'est-à-dire sans organes mobiles tels que vannes, clapets...). Il est très tentant d'augmenter la capacité de la retenue en installant sur le seuil des équipements rustiques tels que batardeau, poutrelle, parpaings..., que l'exploitant est censé enlever avant la crue²². De tels dispositifs ne sont pas acceptables car, outre qu'ils constituent une infraction à l'arrêté d'autorisation du barrage, ils diminuent fortement la capacité de l'évacuateur de crues et augmentent d'autant le risque de surverse sur le remblai.

L'entretien d'un évacuateur à seuil libre consiste essentiellement à enlever périodiquement, et à tout le moins après chaque crue, tous les branchages, corps flottants et autres dépôts obstruant l'entonnement du seuil, le seuil lui-même, le coursier ou le bassin de dissipation. Toute négligence dans cet entretien peut diminuer la capacité de l'évacuateur ou nuire à son bon fonctionnement lors des prochaines crues. Par ailleurs, le travail d'enlèvement des débris est d'autant plus facile qu'il est fait régulièrement.

Dans le même ordre d'idée, un évacuateur de crues placé sur une rive escarpée peut être partiellement obstrué par des éboulements ou des glissements en provenance de cette rive. L'enlèvement de ces matériaux doit également être fait périodiquement. Si ce problème se reproduit fréquemment, il convient d'y apporter les remèdes adaptés (stabilisation de la rive, mise en œuvre de pièges à éboulis, grillages de protection).

Déversoirs équipés d'organes mobiles (vannes, clapets...)

Des essais périodiques (au moins une fois par an) doivent être réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement des organes mobiles et de leur dispositif de commande et de manœuvre (automatismes, alimentation en énergie). Des essais doivent aussi être faits en mode dégradé (manœuvre manuelle).

L'entretien de ces équipements porte sur :

- la peinture des parties métalliques ;
- le graissage des vérins, chaînes, poulies...
- le remplacement périodique des joints.

Il convient, en la matière, de se référer au manuel d'entretien remis par le fabricant.

22. [Lautrin, 2003] relève que, lors d'une enquête réalisée dans le Sud-Ouest et portant sur 215 barrages de 3 à 19,5 m de hauteur, 43 % des seuils déversants étaient équipés de rehausses non autorisées, constituées pour moitié de dispositifs démontables (planches encastrées dans des rainures) et pour moitié de dispositifs fixes (parpaings ou béton) !

Déversoirs équipés de hausses fusibles :

Les points spécifiques concernant l'entretien de ces dispositifs portent sur :

- la vérification que les purges ne sont pas obstruées ;
- la vérification de l'étanchéité des joints et remplacement le cas échéant ;
- la peinture des parties métalliques.

Prise(s) d'eau et vidange

Les vannes de prise d'eau sont manœuvrées régulièrement dans le cadre de l'exploitation normale du barrage. Tout dysfonctionnement apparaîtra donc de lui-même. Par contre, il convient de vérifier au moins une fois par an le bon fonctionnement des éventuelles vannes de garde des prises d'eau.

Les vannes de vidange doivent être essayées au moins une fois par an car il s'agit d'un organe de sécurité du barrage. Toutefois, si une vanne est restée inopérante pendant de nombreuses années, l'essai d'ouverture doit être fait avec précaution et être précédé le cas échéant d'une inspection par plongeur. Le risque de ne plus pouvoir refermer la vanne est en effet à prendre en compte, surtout si l'entonnement n'est pas protégé par une grille. De telles précautions sont bien évidemment superflues en cas de vidange pour raisons de sécurité du barrage.

Si la conduite de vidange est équipée d'une vanne amont de garde et d'une vanne aval de réglage, la vanne de garde est ouverte en fonctionnement normal. Lors des essais, les points suivants doivent être vérifiés :

- ouverture au moins partielle de la vanne de réglage en charge ;
- fermeture et ouverture de la vanne de garde, vanne de réglage fermée ;
- ouverture totale de la vanne de réglage, avec vanne de garde fermée ;
- retour au fonctionnement normal : vanne de garde ouverte, vanne de réglage fermée.

Une ouverture totale de la vidange, plusieurs fois par an et en période de fort débit de la rivière, est recommandée (à condition bien sûr que cela n'aggrave pas de façon significative le risque à l'aval), car elle permet une chasse des sédiments autour de la prise d'eau et prévient ainsi les risques de blocage des vannes par envasement.

Pour l'entretien courant des vannes, il importe de suivre les prescriptions du manuel fourni par le fabricant.

Les conduites doivent être régulièrement observées dans leurs parties visibles et le cas échéant nettoyées et repeintes (respecter les recommandations du fournisseur, vérifier la compatibilité des produits avec le support...). Lors des visites décennales, on procède aussi à l'examen de l'intérieur des conduites, en général au moyen d'une caméra sur chariot.

ANNEXE I

Fiches de visite approfondie des petits barrages

	Pages
Tous types de barrages	62
Barrages en terre	64
Barrages à masque amont	65
Barrages poids en maçonnerie ou en béton	66
Commentaires des fiches de visite	67

FICHE DE VISITE

Tous types de barrages

Points à observer	Renseignements à noter	Commentaires
Événements marquants depuis la précédente visite		consulter le registre du barrage
Suivi des recommandations émises lors de la précédente visite	<ul style="list-style-type: none"> – travaux d’entretien – travaux de confortement – niveaux maxi/mini de la retenue – très fortes crues 	
Pied et zone aval du barrage	<ul style="list-style-type: none"> – zones humides – venues d’eau – végétation arbustive à enlever 	A-1
Dispositif d’auscultation	Procéder à une mesure lors de la visite. Contrôler les fiches de saisie des mesures	
– drains	<ul style="list-style-type: none"> – débit des drains – état d’entretien des exutoires 	A-2
– limnimètre	– état général – fixation ?	
– bornes topographiques et piliers de visée	– stables ? déchaussés ?	
– piézomètres	<ul style="list-style-type: none"> – état des tubes – obstrués ? – protection antivandalisme 	
– vinchons	– état du scellement, rigidité des tiges	
– tous	– repérage/numérotation	

.../...

FICHE DE VISITE

Tous types de barrages

Points à observer	Renseignements à noter	Commentaires
Évacuateur de crues	<i>Noter le type d'évacuateur :</i>	
– seuil	– état général – présence d'obstacles, de corps flottants... – présence de rehausses non autorisées – tassements et points bas ?	A-3
– coursier	– état général – végétation – érosions, sous-cavage – obstruction partielle	A-4
– bajoyers	– état général – stabilité, déformations – fissures – érosions	A-5
– dissipateur d'énergie	– déformation des structures – déplacement des enrochements – fosse d'affouillement	A-6
Vidange et prise d'eau		
– vannes	– en bon état de fonctionnement ? (essais lors de la visite ?) – corrosion, rouille – étanchéité, état des joints	A-7
– tuyau	– corrosion des tuyaux	A-8
– tour de prise	– état général (voir ouvrages béton)	
Recommandations de la présente visite		

FICHE DE VISITE

Barrage en terre

Points à observer	Renseignements à noter	Commentaires
Le couronnement du remblai		
– état général de la crête du barrage	– orniérage dû au passage de véhicules – profil général de la crête – points bas ?	B-1
– murette amont pare-vagues	– état général – fissures ?	B-2
– fissures	– longitudinales ou transversales – profondeur, ouverture, importance	B-3
Le parement amont		
– protection antibatillage et couche de transition	– déplacement des pierres – pierres altérées	B-4
– géotextile	– apparent en certains points – déchirures/vieillessement	B-5
– parement non protégé	– déformations du parement en forme de marches d'escalier – terriers	B-6
Le parement aval		
– état général de la protection par enherbement	– entretien – végétation arbustive ? – terriers	B-7
– ravines	– nombre, importance, profondeur, origine	B-8
– zones humides et suintements	– localisées ? – sur une ou des lignes horizontales ? – végétation singulière	B-9
– amorces de glissement		B-9
Le fossé de pied	– état général, points bas, envahissement par la végétation	B-10



Photo 1. Échelle limnimétrique installée sur une tour de prise (barrage de Douma, Burkina Faso).



Photo 2. Échelle limnimétrique posée sur le parement amont (barrage d'Alzitone, Corse).



Photo 3. Exutoire d'un drain permettant des mesures par empotement depuis le fossé de pied (barrage de Douma, Burkina Faso).



Photos 4a. Seuil calibré triangulaire pour mesure des débits, équipé de son limnimètre amont (barrage de Douma, Burkina Faso).



Photo 4b. Dispositif de mesure automatique télétransmise d'un débit de fossé de drainage, seuil triangulaire et capteur à ultrasons (le Gouet, Côtes d'Armor).



Photo 5a. Appareil de mesure piézométrique.



Photo 5b. Lecture piézométrique.



Photo 6. Protection de tête sur une ligne de piézomètres (remarquer également la borne pour le suivi topographique) (barrage de Douma, Burkina Faso).



Photo 7a. Cellule avec dispositif de mesure à contre pression.



Photo 7b. Tableau de mesure des pressions interstitielles (barrage de Moulin-Papon, Vendée).

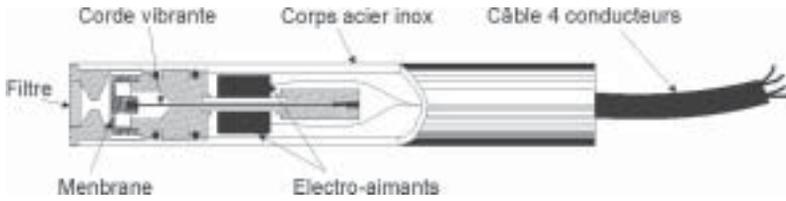


Photo 8. Coupe schématique du capteur (d'après catalogue Glötzl).



Photo 9. Vinchon sur une fissure pour la mesure de l'espace relatif entre deux plots.



Photo 10. Dispositif de mesure d'un pendule inverse.

FICHE DE VISITE

Barrage à masque amont

Points à observer	Renseignements à noter	Commentaires
Le couronnement du remblai		
– revêtement	– type et état – fissures ?	
– murette amont pare-vagues	– état général – fissures ?	B-2
Masque amont d'étanchéité		
– type de masque	– géomembrane ou dalles avec joints étanches	C-1
– <i>masque en béton</i> :		
• dalles	– état général, fissures ? – état de surface	C-2
• joints	– état général, mouvements différentiels	C-3
– <i>étanchéité par géomembrane</i> :		
• géomembrane non protégée	– examen minutieux des surfaces hors d'eau : – poinçonnements, déchirures, – continuité des joints et des raccords aux parties en béton	
• revêtement de protection	– dégradations localisées – glissements	C-4
Parement aval		
– état général	– présence/absence de végétation – altération des enrochements	
– en cas de protection par enherbement	– état général, entretien – végétation arbustive ? – terriers	B-7
Le fossé de pied (le cas échéant)	– état général, points bas, envahissement par la végétation	B-10

FICHE DE VISITE

Barrage poids en maçonnerie
ou en béton et barrage voûte

Points à observer	Renseignements à noter	Commentaires
Le parement amont		D-1
– enduit d'étanchéité (s'il existe)	– mortier ou bitumineux ? – fissuration, accrochage – décollements	D-2
– pierres jointoyées	– état général, joints	D-3
– fissures	– existence, relevé sur plan ou croquis	D-4
– joints entre plots	– état général, protection de l'étanchéité	D-5
Le couronnement		
– fissures	– traversantes amont-aval ? – ouvertes ou fermées	D-6
– parapet	– état général	
Le parement aval		D-7
– suintements et/ou fuites	– localisation – importance	D-8
– dépôts de calcite	– localisés ou généralisés – placage ?	D-8
– joints entre plots	– état général, fuites, suintements – mouvements différentiels	D-5
– joints entre les pierres	– état général	D9
– pierres	– saines ou altérées	
– végétation	– mousses, herbes, arbustes	D-10

Commentaires des fiches de visite

A – Tous types de barrages

A.1 – ABORDS DU BARRAGE

Toute zone humide ou venue d'eau en pied du barrage ou à son aval proche doit être notée, observée et localisée sur plan. Un piquetage au sol est nécessaire pour suivre l'évolution éventuelle d'une zone humide ou d'une source. Si cela est possible, on procède à la mesure du débit afin d'en suivre les variations.

Les abords du barrage doivent être entretenus, exempts de tout arbre ou arbuste (§ contrôle de la végétation).

A.2 – DRAINS

Lors de la visite approfondie de l'ouvrage, il convient de s'assurer :

- que la mesure des débits est précise et fiable (faire exécuter une série de mesures par le surveillant) ;
- que les drains ne sont pas colmatés ;
- qu'il n'y a pas de dépôts de particules de sol à la sortie des drains.

A.3 – OBSTACLES SUR LE SEUIL DE L'ÉVACUATEUR

Les colmatages par les branches ou arbres se produisent lorsque le seuil déversant présente des **obstacles** : piliers de passerelle, piquets supports de batardeaux ou grilles... Il est, dans ce cas, relativement facile d'y remédier. Cela est plus délicat lorsque la taille même de l'ouvrage évacuateur est insuffisante pour permettre le passage d'un arbre. En effet, si le bassin versant est boisé, pour les crues les plus rares, des arbres peuvent être arrachés aux berges. Il faut envisager dans ce cas des grilles à très large espacement, correctement positionnées en amont du seuil, de façon à ne pas entraîner un relèvement du plan d'eau lorsque des arbres y sont piégés.

A.4 – COURSIER

Les risques d'obstruction du coursier par chute de pierres, ou glissement de terrain, sont faciles à diagnostiquer. Selon l'emplacement, ils peuvent provoquer un ennoïement par l'aval du seuil déversant. Dans le cas d'un barrage en terre, ils peuvent aussi provoquer une érosion du parement aval. Les travaux correctifs peuvent être faciles à mettre en œuvre dans certains cas : rehausse des bajoyers du coursier, grillage de protection d'un talus rocheux...

Certains petits ouvrages en terre disposent d'un évacuateur de crues très sommaire dont le coursier est simplement terrassé. Selon la nature plus ou moins résistante du matériau dans lequel le coursier est creusé, il y a une probabilité élevée d'érosion régressive pouvant évoluer jusqu'au contournement complet du barrage. L'observation de ce matériau et de son incision permet de porter un jugement sur ce phénomène. Un suivi régulier par des prises de vue est à recommander. En cas d'évolution mettant en péril la pérennité de l'ouvrage, il faut en urgence procéder au confortement provisoire du seuil par des enrochements ou des gabions ou à la vidange de la retenue.

L'état du radier du coursier est à examiner avec soin si l'évacuateur ne débite pas.

A.5 – BAJOYERS

Lors de la visite, la bonne **tenue des bajoyers** en béton ou en maçonnerie peut être appréciée en observant les fissures ou les mouvements relatifs des éléments successifs. Lorsque de tels phénomènes sont constatés, il est important de suivre leurs évolutions. Aussi, la pose d'appareils de contrôle est-elle généralement la première mesure à conseiller. Si l'évacuateur ne débite pas, il faut en profiter pour examiner avec attention le pied des bajoyers à la jonction avec le radier (recherche d'amorces de sous-cavage). Dans le cas des bajoyers en maçonnerie, selon leur état, des travaux de rejointoiement et d'enlèvement de la végétation sont éventuellement à conseiller.

A.6 – DISSIPATEUR D'ÉNERGIE

Lorsqu'un dissipateur d'énergie est incorrectement dimensionné, des **érosions** peuvent être observées :

- à son aval si le ressaut hydraulique n'est pas localisé entièrement dans le bassin dissipateur ;
- sur ses côtés si des déversements se produisent par-dessus les bajoyers.

Ces phénomènes d'érosion peuvent être dangereux dans le cas d'un barrage en remblai dont le pied pourrait être érodé, entraînant alors un début de glissement. Le radier du dissipateur bétonné peut, en outre, être érodé ou soulevé en cas de très forte crue ou de manœuvre brutale d'une vanne. Son observation est donc nécessaire.

A.7 – VANNES DE VIDANGE

Les vannes de vidange doivent être **manœuvrées** à l'occasion d'une visite approfondie. Toutefois, il conviendra d'être prudent dans le cas d'un barrage dont on connaît mal les dispositifs de garde et pour lequel il n'y a pas eu de manœuvre de vannes depuis plusieurs années. Cela peut conduire, dans certains cas, à ne pas pouvoir refermer la vidange. Le cas évidemment favorable est celui où il existe une vanne de réglage et une vanne de garde, appelée aussi batardeau. En exploitation normale, la vanne de garde est maintenue levée. L'essai consiste alors à fermer la vanne de garde puis à ouvrir la vanne de vidange.

Sous les réserves mentionnées ci-dessus, il faut insister sur la nécessité impérieuse d'une manœuvre périodique de ces organes et sur le soin à porter au graissage des parties mobiles.

A.8 – TUYAU DE VIDANGE

Un diagnostic sur l'état d'un organe de vidange n'est possible que si celui-ci est visitable. Nous abordons ci-après le cas courant d'un tuyau en acier. Si le tuyau est placé à l'intérieur d'une galerie visitable, on s'intéressera à sa corrosion, en particulier au droit des soudures et des raccords ou colliers. Dans le cas d'un tuyau placé au sein du massif, on pourra le visiter si son diamètre est supérieur à 1 m et si un organe de garde amont existe (s'assurer au préalable qu'aucune manœuvre intempestive n'est possible pendant la visite, et que l'atmosphère est respirable sans danger). Pour des diamètres plus petits, l'inspection du tuyau se fait par caméra téléguidée.

Si ce diagnostic rapide montre un fort état de corrosion, une intervention urgente s'impose dans le cas d'un barrage en terre dont le tuyau de vidange n'est pas entièrement entouré par du béton.

B – Barrages en terre

B.1 – CRÊTE DU BARRAGE

Sur un barrage en terre, il est important que la crête soit en très bon état. Pour prévenir les érosions liées au ruissellement, on lui donne habituellement un profil présentant une légère pente vers l'amont. Un revêtement en tout-venant compacté offre une bonne pérennité.

A contrario, la formation d'ornières ou de points bas est très nuisible, car ils constituent des zones de concentration des ruissellements qui acquièrent ainsi une puissance érosive accrue. De ce point de vue, la circulation des véhicules sur la crête est préjudiciable et peut, le cas échéant, être interdite.

Ornières et points bas doivent être remblayés avec du tout-venant soigneusement compacté. En cas de mauvais état général de la crête, il convient de prévoir un rechargement et un reprofilage complets (chargeur, niveleuse, compacteur).

B.2 – MURETTE AMONT PARE-VAGUES

Cette murette en maçonnerie, en béton, ou constituée d'une rangée de gabions, sert à augmenter la revanche et tient lieu de parapet pour les barrages où la crête supporte une route. Les déformations et fissures qui peuvent l'affecter ne sont pas graves en elles-mêmes. Par contre, elles peuvent être des indices de tassements du remblai.

Si la crête du barrage présente une pente vers l'amont, la murette pare-vagues doit évidemment être percée d'exutoires pour l'évacuation des eaux. Il convient lors de la visite de vérifier que ces exutoires ne sont pas obstrués et qu'il n'y a pas d'érosion sur le talus amont au droit de ces exutoires (si tel est le cas, aménager des cunettes ou fossés revêtus).

B.3 – FISSURES

Des fissures longitudinales (dans le sens de rive à rive) longues et régulières ont généralement pour origine des tassements différentiels d'une zone de remblai par rapport à une autre. Plus localisées et situées près d'un des bords de la crête, elles peuvent indiquer une amorce de glissement du talus. Il convient donc de recouper ces observations avec d'autres anomalies : points bas sur la crête, fissures des murettes ou leviers topographiques en cas de tassements, bourrelets sur le talus et suintements en cas d'amorces de glissement. Si la cause du tassement est clairement identifiée, on procédera à un rechargement de la crête afin de restaurer le profil d'origine. *En cas d'amorce de glissement, il faut piqueter les limites de la zone concernée et, en cas d'aggravation, procéder à une vidange au moins partielle du barrage.* Une expertise s'impose pour déterminer l'origine du glissement et le confortement à adopter.

Des fissures transversales (amont-aval) ou sans direction privilégiée sont, en général, liées à des phénomènes de retrait. Il faut vérifier la profondeur de ces fissures. Lorsqu'elle ne dépasse pas 10 à 30 cm, le phénomène ne concerne que la couche de revêtement, constituée probablement de matériaux trop plastiques ou compactés dans de mauvaises conditions. Suivant les cas, on procédera à un rechargement de la crête ou à un simple compactage complémentaire après arrosage. Par contre, lorsque les fissures de retrait dépassent 0,5 à 1,0 m et qu'elles sont orientées amont-aval, elles doivent être considérées comme très dangereuses, car pouvant être à l'origine de fuites et de

renards lorsque la retenue atteint ses niveaux les plus élevés. La réparation doit alors s'orienter vers la réfection complète de toute la tranche de remblai affectée par ce phénomène.

B.4 – PROTECTION ANTIBATILLAGE

Les désordres sur la couche de protection antibatillage sont le plus souvent dus à un dimensionnement insuffisant des enrochements, qui sont déplacés par l'action des vagues. En cas de désordres localisés, il suffit de procéder à des réparations ponctuelles en mettant en place des enrochements plus gros à la place de ceux qui ont été déplacés.

B.5 – GÉOTEXTILE

Un géotextile placé sous un enrochement pour y jouer un rôle de transition peut subir essentiellement deux types de dégradation :

- déchirement ou poinçonnement par les enrochements, soit lors de la pose, soit à l'occasion de mouvements des pierres provoqués par le batillage ;
- vieillissement rapide dû à une exposition au soleil (larges interstices entre les pierres du perré lors de la pose ou mouvements des pierres ayant mis à nu le géotextile).

Dans le premier cas, la réparation consiste à découvrir le géotextile sur la zone déchirée ou poinçonnée, à poser une pièce de géotextile largement débordante par rapport à la zone abîmée et à remettre les enrochements en place. Si les pierres ont bougé du fait de leur poids insuffisant, on les remplace bien sûr par des blocs plus lourds.

Dans le second cas, il faut s'assurer que la dégradation observée en un point donné n'est pas généralisée à l'ensemble du parement. Si la dégradation est localisée, la réparation est identique à celle décrite ci-dessus. Si la dégradation du géotextile est généralisée sur toute la surface du talus, cela est probablement dû au choix d'un géotextile non adapté aux conditions d'exposition dans l'ouvrage et il faut alors procéder à la réfection complète de la protection du talus amont²³.

B.6 – PAREMENT AMONT NON PROTÉGÉ

Cette solution ne présente une bonne garantie de pérennité qu'à la double condition que :

- le marnage du plan d'eau soit faible ;
- la pente du talus amont soit douce.

Les désordres sur un parement non protégé se manifestent par la création de marches d'escalier dans la zone du marnage (voir § Réparations des désordres).

B.7 – VÉGÉTATION ARBUSTIVE

Par le réseau de racines qu'ils développent, les arbres et arbustes sont à proscrire sur les barrages et à leur proximité immédiate.

Deux conséquences néfastes sont à craindre :

- le soulèvement d'ouvrages rigides lors de la croissance des racines ;

23. Pour le choix, le dimensionnement et la mise en œuvre des géotextiles, on peut utilement se référer aux publications du CFG : « Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration ».

– la création de zones de cheminement préférentielles pour l’eau le long des racines, en particulier après la mort de l’arbre, et les risques de développement de renard.

La crête, les talus et les abords d’un barrage jusqu’à une distance d’au moins 10 à 15 m du pied doivent donc être exempts de tout arbre ou arbuste.

B.8 – RAVINES

Causé par le ruissellement de l’eau, le creusement de ravines tend à s’auto-entretenir car les ravines existantes deviennent des lignes de concentration des débits, lesquels ont d’autant plus de puissance pour continuer le creusement.

Il est important, lors de la visite, d’identifier l’origine de la ravine afin de traiter également la cause : point bas sur la crête du remblai, contournement d’un ouvrage en béton, zone de remblai mal compactée... Pour la réparation se reporter au § Comblement des ravines.

B.9 – ZONES HUMIDES — AMORCES DE GLISSEMENTS

Il faut être très vigilant, car des suintements ou des écoulements qui ne transitent pas par le drain peuvent être le signe avant-coureur d’un renard. Ces zones sont habituellement soulignées par une végétation singulière. Il convient donc d’effectuer un suivi très régulier de telles anomalies afin d’en connaître les évolutions. Un piquetage des zones concernées est à prescrire. Un suivi photographique est précieux, s’il est possible.

Si un débit est mesurable, il convient d’en organiser la collecte et de le mesurer. Enfin, *si on observe une venue d’eau importante avec entraînement de grains de sols, on est en présence d’un renard et il faut procéder à la vidange immédiate de la retenue.*

Les amorces de glissements se traduisent en général par un bombement du parement aval près de sa partie inférieure, ainsi que par une (ou des) fissure(s) en crête orientée(s) de rive à rive et s’incurvant à ses (leurs) extrémités.

B.10 – FOSSÉ DE PIED

Le rôle du fossé de pied est de canaliser et d’évacuer les eaux de drainage et les eaux de ruissellement vers la rivière. Le fonctionnement du fossé de pied est perturbé en cas :

- d’envahissement par la végétation ;
- de points bas dans le profil en long ;
- de dépôts solides liés à des ravines ou des instabilités des talus du fossé.

Ce fossé doit donc être régulièrement curé et entretenu. Cette tâche est facilitée s’il est revêtu.

Si des seuils de mesure des débits ont été installés en quelques points du fossé, il faut veiller au bon fonctionnement de ces seuils (régime dénoyé).

C – Barrages à masque amont

C.1 – MASQUE AMONT D’ÉTANCHÉITÉ

Il convient de connaître la nature exacte du masque amont qui, pour les petits barrages, se rattache en général à l’un des deux cas types suivants :

- dalles béton avec joints étanches (type « waterstop ») : rubriques C2 et C3 ;
- dispositif d’étanchéité par géomembrane (DEG) : rubriques C4 et C5.

C.2 – DALLES EN BÉTON ARMÉ

Les dégradations localisées des dalles peuvent être dues à une mauvaise qualité d'origine, à des chocs mécaniques ou à des éclatements du béton par insuffisance d'enrobage des armatures. La réparation se fait par ragréage, après avoir enlevé les parties non adhérentes, gratté et passivé les armatures et nettoyé les surfaces.

Des fissures traversantes peuvent affecter l'étanchéité. Elles sont dues en général à des tassements différentiels importants du remblai ou à une insuffisance du ferrailage des dalles. Selon l'importance du phénomène, les conséquences peuvent être plus ou moins graves pour la pérennité de l'ouvrage. S'il s'agit de quelques fissures localisées et peu ouvertes, une réparation peut être tentée (sciage sur quelques centimètres de profondeur et remplissage à base de résines synthétiques). Si le phénomène a une plus grande ampleur, une expertise s'impose.

C.3 – JOINTS ÉTANCHES

Il s'agit en général de joints avec une lame d'étanchéité de type « *waterstop* ». Au-dessus de la lame d'étanchéité, l'espace entre deux dalles adjacentes est rempli d'une planche de coffrage perdu ou de mastic bitumineux, de façon à assurer une protection physique du *waterstop*. Il faut s'assurer que cette protection est toujours présente et, dans le cas contraire, procéder à la réparation en coulant du mastic bitumineux.

Au niveau des joints, il faut observer les éventuels mouvements différentiels entre dalles dus aux tassements du remblai ou de la fondation. Au-delà d'une certaine ampleur, de tels mouvements peuvent entraîner la déchirure du *waterstop*, ce qui compromet l'étanchéité. Une expertise s'impose pour déterminer l'ampleur des réparations à entreprendre dans une telle situation.

C.4 – ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE PROTÉGÉE

Dans ce cas, la partie visible est la couche de protection de la géomembrane. Cette protection peut être constituée de dalles en béton, de pavés autobloquants ou d'un perré. Les anomalies et désordres suivants peuvent être observés :

- dégradations localisées des dalles ou des pavés ;
- altération des moellons du perré ;
- glissements localisés de la couche de protection ;
- glissement d'ensemble de la couche de protection ;
- tassements différentiels du remblai.

Les dégradations localisées des dalles, pavés ou moellons peuvent être dues à une mauvaise qualité d'origine ou à des chocs mécaniques. Elles se traitent par remplacement ou réparation (pour les dalles) des éléments altérés après avoir soigneusement vérifié que la géomembrane et le géotextile sous-jacents n'ont pas subi de dégradations.

Un glissement général mais faible de la couche de protection est parfois observé : il est dû le plus souvent à l'effet du batillage. De ce fait, un espace s'ouvre au sommet de la couche de protection, qu'il faut venir remplir de mortier dès qu'il dépasse un à deux centimètres d'ouverture, et ce jusqu'à stabilisation complète.

Un glissement de grande ampleur de la couche de protection constitue un désordre grave qui nécessite une intervention immédiate. Un tel désordre peut être dû à un coefficient de frottement insuffisant à une des interfaces du DEG ou à l'apparition de pressions interstitielles non contrôlées sous la membrane lors d'une vidange rapide. Un diagnostic approfondi des causes du désordre doit être fait par un spécialiste qui déterminera également les travaux de confortement à entreprendre.

Les tassements différentiels du remblai peuvent entraîner des déchirements de la membrane, en particulier dans le cas d'une protection par dalles en béton. Il faut donc s'attacher à déceler tout mouvement différentiel entre les dalles, susceptible de provoquer une déchirure de la membrane, ce qui constituerait un désordre grave nécessitant l'appel à un spécialiste. Les tassements différentiels sont, dans certaines limites bien sûr, moins graves avec une protection par pavés ou moellons, qui est capable de s'adapter à de légers mouvements du support sans altérer la membrane.

C.5 – ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE NON PROTÉGÉE

La surveillance de la membrane doit être fréquente et attentive. L'étanchéité de la membrane peut être compromise par :

- des poinçonnements dus à des agressions (corps flottants, glissement de blocs de glace, chutes de blocs rocheux, piétinement du bétail, actes de malveillance ou agressivité de la couche support) ;
- des déchirements par mise en tension excessive (angles de talus saillants ou rentrants) ;
- des soulèvements et arrachements dus à l'effet du vent lorsque la retenue est vide, si la membrane est insuffisamment lestée.

Dans les deux premiers cas, la réparation se fait par soudure ou collage d'une pièce de géomembrane de même nature, largement débordante par rapport à la zone dégradée. Si la déchirure est due à une zone tendue en peau de tambour (par exemple à l'angle entre un pied de talus et une risberme), il peut être judicieux, pour relâcher les tractions, de couper la partie tendue avant de la recouvrir par la bande de membrane à souder ou coller. Dans le troisième cas, et vu que les dégâts sont en général de grande ampleur, il faut le plus souvent remplacer les lés arrachés et renforcer le lestage de la membrane.

Par ailleurs, le drainage des gaz est recommandé lorsque le DEG concerne toute la cuvette et il convient alors de vérifier périodiquement que les exutoires des gaz ne sont pas bouchés.

D – Barrages poids en maçonnerie ou en béton

D.1 – PAREMENT AMONT

L'observation du parement amont n'est pas toujours possible. D'une manière générale, il est en effet beaucoup plus utile de visiter ce type de barrage lorsqu'il est plein, afin de bien observer les suintements éventuels. Par contre, si l'état du parement aval révèle une étanchéité défectueuse du corps de l'ouvrage, il convient d'envisager une observation du parement amont à l'occasion d'un abaissement du plan d'eau. Les zones où l'étanchéité du parement amont est défectueuse sont en général soulignées par des traces d'humidité correspondant au ressuyage du corps de l'ouvrage.

D.2 – ENDUIT D'ÉTANCHÉITÉ

L'enduit peut être d'origine ou peut avoir été ajouté après coup. On observe, en particulier, si les joints ou les éventuelles fissures sont ouverts. La connaissance du débit de fuite et de son évolution avec la cote de l'eau permet de conforter utilement le jugement sur l'efficacité de l'enduit. Par sondage au marteau, on examine si l'enduit est adhérent. Les cloquages et décollements sont repérés. Les dégradations sont le plus souvent localisées dans la zone de marnage. Selon l'importance des dégradations éventuelles, il faut procéder à des réfections localisées ou générales.

D.3 – PIERRES JOINTOYÉES

Une observation détaillée des joints permet de voir s'ils sont continus et sains. Une vue d'ensemble du parement par temps sec et dans les jours qui suivent la baisse de la retenue est très révélatrice : en cas de joints défectueux, on observe des suintements.

D.4 – FISSURES SUR LE PAREMENT AMONT

Sur le plan mécanique, on cherche à voir si les fissures intéressent le corps de l'ouvrage et sont traversantes. Si tel est le cas, des dispositifs de mesure d'écartement sont nécessaires (au-dessus du niveau normal des eaux).

Sur le plan hydraulique, on cherche à voir si une zone de fissures amont correspond à une zone de suintements ou d'écoulements aval. Dans ce cas, un traitement des fissures par produit souple peut être recommandé, afin de diminuer les pertes d'eau, mais aussi le lessivage du liant.

D.5 – JOINTS ENTRE PLOTS

Les barrages voûtes et les barrages poids en béton sont construits par plots de 15 à 20 m de longueur, délimités par des joints verticaux. L'étanchéité de ces joints est assurée par une lame de cuivre pour les ouvrages anciens et par un joint « waterstop » pour les ouvrages récents. Côté amont, le joint est protégé des agressions mécaniques et il convient d'observer l'état de cette protection. Côté aval, l'observation de suintements ou de fuites renseigne sur l'étanchéité du joint. Des écaillages du béton de part et d'autre du joint peuvent être dus à des mouvements différentiels entre plots, qu'il convient de mesurer par des vinchons ou fissuromètres.

D.6 – FISSURES AMONT-AVAL

On cherche à regarder si les fissures de la crête se poursuivent sur les parements amont et aval. Si tel est le cas, une auscultation est nécessaire comme pour le point D.4.

D.7 – PAREMENT AVAL

Dans le cas d'un barrage déversant, on observe le parement aval en l'absence de déversement, en abaissant le plan d'eau. Il est préférable de faire ces observations en saison sèche.

D.8 – SUINTEMENTS, FUITES, CALCITE

De légers suintements sont fréquents et sans gravité. Mais des écoulements trop marqués peuvent s'accompagner d'une progressive dissolution du liant. La présence de calcite sur le parement aval en est une présomption. Présomption seulement, car les entraînements de liant peuvent être arrêtés. Il convient donc toujours de faire procéder à l'enlèvement des plaques de calcite, après établissement d'un dossier photo. L'observation ultérieure du parement en

sera facilitée et la réapparition de calcite dans les années suivantes sera considérée comme un signe inquiétant.

Si des fuites sont mesurables, on cherche chaque fois que possible à les collecter, afin de pouvoir mesurer périodiquement leur débit. Dans ce cas, une analyse annuelle de la teneur en CaCO_3 est également recommandée, en comparaison avec celle de la retenue. Une augmentation est un signe inquiétant de lessivage du liant, impliquant perte de poids et appauvrissement des qualités mécaniques.

D.9 – JOINTS ENTRE LES PIERRES DU PAREMENT AVAL

Les joints du parement aval sont assez souvent en mauvais état surtout s'ils sont le siège de suintements ou de fuites. Sauf si la stabilité mécanique des pierres du parement aval était menacée, on ne doit pas refaire systématiquement les joints dégradés. En effet, un rejointoiement trop parfait est susceptible de rendre étanche le parement aval, ce qui provoquerait une augmentation des pressions internes au corps de l'ouvrage. La réfection éventuelle des joints du parement aval doit se faire en préservant la capacité de drainage de ce parement (barbacanes, joints discontinus).

D.10 – VÉGÉTATION SUR LE PAREMENT AVAL

La présence de végétation est favorisée par l'existence de suintements et de fuites. Elle se loge le plus souvent dans les joints et elle contribue à accélérer leur dégradation, pouvant même aller jusqu'à déchausser des pierres par la croissance des racines. Toute végétation doit donc être systématiquement et régulièrement enlevée des parements d'un ouvrage en maçonnerie.

ANNEXE II

Analyse statistique des mesures

Analyse statistique des mesures d'auscultation

Une telle analyse n'est en général pas nécessaire pour les petits barrages. Cependant, dans certains cas particuliers, cela permet d'approfondir l'exploitation des mesures et d'apporter des éléments chiffrés sur le comportement du barrage. Nous en décrivons donc succinctement les principes.

Afin de pouvoir séparer qualitativement et quantitativement les variations réversibles et les phénomènes évolutifs, il convient de procéder à une analyse statistique des mesures, grâce à des logiciels spécialement adaptés.

L'analyse consiste à ajuster au nuage de mesures expérimentales, une fonction, ou un modèle numérique, capable d'expliquer chacune des variations de nature différente. Le modèle le plus couramment retenu s'écrit formellement en une somme de trois termes :

$$X(q, z, t) = S(q) + H(z) + F(t)$$

Le terme $S(q)$ représente la part de la variation due aux effets climatiques, $H(z)$ la variation d'origine hydrostatique et $F(t)$ l'effet évolutif ou irréversible.

Il suffit alors de choisir judicieusement l'expression des fonctions S , H et F et d'ajuster X au nuage expérimental pour pouvoir associer à toute mesure expérimentale une « valeur calculée » aussi proche que possible.

Si la mesure du temps écoulé et du niveau d'eau ne pose aucun problème, celle de la température se heurte à quatre difficultés : fiabilité de la mesure, existence de gradients entre différents points de la structure, effets de pointe (dus à un ensoleillement local et/ou fugitif) et enfin, réponse différée due à l'inertie thermique. Dès lors, la question de savoir s'il faut mesurer la température de l'eau, de l'air ou celle de la structure, et en combien de points, peut donner lieu à des tâtonnements infinis. Pour trancher cette difficile question, on assimile en général la variable « température » à une variation « saison » de période annuelle.

Il convient cependant de bien garder à l'esprit les conséquences de cette simplification : l'effet saisonnier sera celui de l'année moyenne du point de vue climatique. Pendant une période où la température s'écartera durablement et sensiblement de la « normale saisonnière », les mesures pourront différer sensiblement de celles calculées par le modèle.

À toute observation $X_o(s, z, t)$ sera associée une valeur calculée $X_c(s, z, t)$ telle que :

$$X_o(s, z, t) = X_c(s, z, t) + e$$

e représentant les erreurs expérimentales, ainsi que les effets de toutes les variations non prises en compte par le modèle (par exemple la pluie).

La détermination des coefficients de la loi s'opère sans difficulté par un traitement utilisant, pour sélectionner les variables, un processus statistique dit ascendant, c'est-à-dire que les variables sont sélectionnées une par une, chaque nouvelle variable sélectionnée étant celle qui explique le mieux la variance résiduelle.

Pour en savoir plus _____

Ministère de l'Agriculture, 1977. *Technique des barrages en aménagement rural*, (rééd. 1989), 325 p.

Cemagref, Aix-en-Provence, 1992. *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens*, coll. « Études », série *Hydraulique agricole*, n° 13, 99 p.

CIGB Paris, 1991. *Étanchéité des barrages par géomembranes*, 140 p.

G Degoutte (coord.), 1997. *Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*, CFGB, Cemagref Éditions, 173 p. (rééd. 2002 sous forme de CDROM français-anglais).

J.-M. Durand, P. Royet, P. Mériaux, 1999. *Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*, Cemagref Éditions, 416 p.

M. Poupart et P. Royet, 2001. *La surveillance des barrages*, Colloque technique, Aix-en-Provence, CFGB, 48 p.

BETCCB Grenoble, 2002. *Guide pour le contrôle des barrages en exploitation*.

J.-P. Fabre, 2003. Flow Rate Monitoring and Drainage Curtain Maintenance in Gravity Dams, 21^e Congrès des grands barrages, Montréal, Q82-C26, vol. IV, p. 369-372.

D. Lautrin, 2003. *Vieillesse et réhabilitation des petits barrages en terre*, Cemagref Éditions, 240 p.

Édition

Julienne Baudel (Cemagref)

Mise en page

Christelle Bretonnier (Desk)

Infographie

Françoise Peyriguer (Cemagref)

Crédit photographique

Couverture et photos des planches couleurs : © Cemagref, Paul Royet



Après une présentation du contexte et des objectifs de la surveillance des barrages, ce guide traite des modalités de l'inspection visuelle et de l'auscultation des ouvrages de petite et moyenne dimensions (c'est-à-dire moins de 20 mètres de hauteur par rapport au terrain naturel) de tous types, récents ou anciens. Il est complété de recommandations adaptées à chaque type de barrage et de fiches de visite pour les relevés de mesure et les visites techniques.

Destiné en priorité aux propriétaires et exploitants, qu'il s'agisse de collectivités territoriales, d'associations autorisées d'agriculteurs, ou de propriétaires privés, ce document intéressera également les ingénieurs et techniciens intervenant sur ce type de barrage dans le cadre soit de missions de contrôle de l'État soit de missions d'ingénierie ou d'expertise.

Paul Royet, à l'issue d'une formation à l'École centrale et à l'Engref, a consacré l'essentiel de sa carrière au génie civil, plus particulièrement dans le domaine des barrages et des digues, tant en France qu'à l'étranger. Au Cemagref, il coordonne une partie des activités de recherche et d'expertise au sein de l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie ». Il est rapporteur au Comité technique permanent des barrages et membre du Comité français des barrages et réservoirs. Il enseigne la mécanique des sols et anime diverses formations continues sur la sécurité des ouvrages hydrauliques.

En couverture : Petit barrage voûte à simple courbure, cliché : Paul Royet, Cemagref.

www.quae.com

 Cemagref

 CIRAD  INRA

 Ifremer

ISBN : 2-85362-662-8

ISSN : en cours

Réf. : CF6628

Prix : 23 €

