



Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens

Coordination : Gérard Degoutte



GUIDE POUR LE DIAGNOSTIC RAPIDE DES BARRAGES ANCIENS

Coordination : G. Degoutte

Document réalisé avec le concours du Fonds National
pour le Développement des Adductions d'Eau Rurales
(F.N.D.A.E.)

ministère de l'**agriculture** et du **développement rural**

**Direction de l'Espace Rural
et de la Forêt**

78, rue de Varenne
75007 Paris

Tél. : (1) 49.55.49.55



**CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GÉNIE RURAL
DES EAUX ET DES FORÊTS**

GROUPEMENT AIX EN PROVENCE
Le Tholonet, B.P. 31
13612 Aix-en-Provence Cedex 1
Tél. : 42 66 93 10 • Télex : 401 910 F
Télécopie : 42 66 88 65

Les *ÉTUDES* du CEMAGREF

Série : Ressources en eau

N° 1 - Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique - 1990, 164 pages - 200 F

N° 2 - Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle - 1990, 228 pages - 250 F

N° 3 - Typologie aquacole des marais salants de la côte atlantique - 1991, 232 pages - 200 F

N° 4 - Pêche, biologie, écologie des aloses dans le système Gironde-Garonne-Dordogne - 1991, 392 pages - 350 F

N° 5 - La pêche professionnelle fluviale et lacustre en France - 1992, 290 pages - 300 F

N° 6 - Les mono-oxygénases de poissons, un outil pour la caractérisation des pollutions chroniques - 1992, 232 pages - 250 F

Série : Hydraulique agricole

N° 1 - Etude de la qualité des eaux de drainage. Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale. La tranchée de drainage. Une nouvelle expression de la hauteur équivalente. A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée - 1986, 21 x 29,7 - 182 pages - 200 F

N° 2 - Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains - 1987, 21 x 29,7 - 220 pages - 200 F

N° 3 - Secteurs de références drainage. Recueil des expérimentations - 1988, classeur 20 x 26 - 92 fiches - 150 F

N° 4 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA - 1989, 334 pages - 250 F

N° 5 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement - 1989, 322 pages - 250 F

N° 6 - Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement - 1989, 140 pages - 150 F

N° 7 - Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions - 1992, 144 pages - 200 F

N° 8 - Estimation de l'évapotranspiration par télédétection. Application au contrôle de l'irrigation - 1990, 248 pages - 250 F

N° 9 - Hydraulique à l'interface sol/drain - 1991, 336 pages - 250 F

N° 10 - Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique - 1991, 248 pages - 200 F

N° 11 - Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes - 1991, 140 pages - 150 F

N° 12 - Colmatage des drains et enrobages : état des connaissances et perspectives. 1991, 152 pages - 200 F

N° 13 - Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens - 1992, 100 pages - 150 F

Série : Equipement des IAA

N° 1 - Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement - 1990, 56 pages - 100 F

Série : Forêt

N° 1 - Annales 1988. 1989, 126 pages - 150 F

N° 2 - Le Massif Central Cristallin. Analyse du milieu - Choix des essences - 1989, 104 pages - 150 F

N° 3 - Les stations forestières du pays d'Othe - 1990, 174 pages - 150 F

N° 4 - Culture d'arbres à bois précieux en prairies pâturées en moyenne montagne humide - 1990, 120 pages - 150 F

N° 5 - Annales 1989 - 1991, 196 pages - 150 F

N° 6 - Annales 1990 - 1991, 268 pages - 200 F

N° 7 - Les stations forestières du plateau nivernais - 1991, 164 pages - 150 F

N° 8 - Les types de stations forestières de Lannemezan, Ger et Moyen Adour - 1991, 436 pages - 250 F

N° 9 - Annales 1991 - 1992 - 190 pages - 200 F

Série : Production et économie agricoles

N° 1 - GEDE Logiciel d'aide à la décision stratégique pour l'exploitation agricole - 1992, 192 pages - 200 F

N° 2 - AGREGEDE : méthode de simulation de la production agricole d'une région - Application en Ardèche - 1992, 232 pages - 250 F

Série : Gestion des services publics

N° 1 - Économie et organisation à l'échelle départementale du financement du renouvellement des réseaux d'eau potable - 1991, 76 pages - 150 F

Série : Montagne

N° 1 - Éléments d'hydraulique torrentielle - 1991, 280 pages - 300 F

N° 2 - Aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels - 1992, 152 pages - 150 F

A commander au CEMAGREF - DICOVA, BP 22, 92162 ANTONY CEDEX - Tél. : (1) 40.96.61.32
joindre votre paiement à la commande

GUIDE POUR LE DIAGNOSTIC RAPIDE DES BARRAGES ANCIENS

Par le CEMAGREF

● Département Hydraulique Agricole

Divisions:

Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation

Groupement d'Aix-en-Provence

BP 31

13612 Aix-en-Provence Cedex 1

Tél. : 42 66 93 10

Ouvrages hydrauliques et voirie

Groupement d'Antony

BP 21

92185 Antony Cedex

Tél. : (1) 40 96 61 21

Ouvrages et réseaux hydrauliques

Groupement de Bordeaux

BP 3

33611 Gazinet Cedex

Tél. : 56 36 09 40

et le

● Département Ressources en eau

Division :

Hydrologie, hydraulique

Groupement de Lyon

CP 220

69336 Lyon Cedex 09

Tél. : 72 20 87 87

Le CEMAGREF est un organisme de recherches dans les domaines de l'eau, de l'équipement pour l'agriculture et l'agro-alimentaire, de l'aménagement et de la mise en valeur du milieu rural et des ressources naturelles.

En contact permanent avec les agents économiques et les collectivités, il cherche à constituer des outils mieux adaptés dans différents secteurs d'activités :

- eau, hydrologie, hydraulique agricole, qualité des eaux
- risques naturels et technologiques
- montagne et zones défavorisées
- forêts
- machinisme et équipement agricoles
- équipement des industries agro-alimentaires
- production et économie agricoles.

Le CEMAGREF est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique sous la tutelle des ministères de la Recherche et de l'Espace, de l'Agriculture et du Développement Rural.

Il emploie 970 agents dont 420 scientifiques répartis en 10 groupements : Aix-en-Provence, Antony, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, La Martinique, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson, Rennes.

RESUME

Le guide pour le diagnostic rapide des barrages existants est destiné aux ingénieurs des services de l'état chargés du contrôle des barrages. S'appliquant plus particulièrement aux barrages en remblai et aux barrages poids de moins de 30 mètres de hauteur, ce guide présente une méthodologie de diagnostic basée sur :

- la visite détaillée de l'ouvrage ;
- la vérification des conditions de stabilité ;
- l'estimation de la crue de projet et de la capacité des organes d'évacuation.

Le diagnostic rapide permet de dire si le barrage ne pose pas de problème, s'il nécessite des études de diagnostic complet ou des travaux d'entretien, de renforcement ou un complément d'instrumentation, s'il doit être vidé sans délai partiellement ou totalement.

Mots clés : barrages ; diagnostic ; vieillissement ; sécurité publique ; auscultation.

ABSTRACT

These guidelines are a quick evaluation procedure for existing dams. They have been prepared for public sector engineers responsible for dam safety supervision.

Focusing mainly on embankment and gravity dams less 30 m. high, they describe the diagnosis methodology based on detailed visual inspection, recalculation of stability, reestimation of the design flood and spillway capacity. With a quick diagnosis, it can be decided whether the dam is acceptable, needs more thorough investigation or maintenance works, new instrumentation, or rehabilitation, or immediate drawdown.

Keywords : dams ; diagnosis ; ageing ; public safety ; instrumentation ; monitoring.

PREAMBULE.

Le guide pour le diagnostic des barrages anciens a été rédigé par le CEMAGREF à la demande de la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l'Agriculture. Il a été financé par le FNDAE (Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau) et son contenu a été défini en liaison avec le Bureau de l'Hydraulique Agricole et des Grands Ouvrages. Il est principalement destiné aux ingénieurs des services de l'Etat chargés du contrôle des barrages en service.

Le CEMAGREF a lancé depuis plusieurs années un programme d'étude sur la sécurité des barrages anciens : méthodologie de reconnaissance, de diagnostic, suivi d'auscultation, ondes de rupture... Il a donné de nombreux avis sur des barrages existants à la demande des Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt ou d'autres services. Il établit sur 3 ans un état des lieux de la sécurité des barrages français dont la police des eaux relève du Ministère de l'Environnement. Ces divers travaux bénéficient de financements des Ministères de l'Environnement et de l'Agriculture.

Au sein du CEMAGREF, ce guide a bénéficié de l'expérience des départements Hydraulique Agricole et Ressources en Eau. Il a été rédigé et coordonné par Gérard DEGOUTTE. Danièle LAUTRIN a participé à la rédaction du chapitre sur les barrages en remblai, Bernard CHASTAN a rédigé le texte sur les conséquences d'une rupture. L'ensemble du document a bénéficié de la relecture et des conseils de Emmanuel ALONSO, Claude BERNHARD, François GOUSSÉ, Danièle LAUTRIN, Benoît LESAFFRE, André PAQUIER et Paul ROYET.

S O M M A I R E

RESUME	6
Préambule	7
Objectif du diagnostic rapide	11
Points communs à tous les barrages	15
par G. DEGOUTTE et B. CHASTAN	
Barrages en remblai	49
par G. DEGOUTTE et D. LAUTRIN	
Barrages poids	73
par G. DEGOUTTE	

OBJECTIF DU DIAGNOSTIC RAPIDE

Il existe en France et dans le monde un très grand nombre de barrages anciens souvent mal connus et mal surveillés. Le public s'est habitué à leur présence et pourtant ils présentent un fort potentiel d'insécurité. Il est maintenant admis dans tous les pays que ces barrages doivent faire l'objet d'une vérification comprenant une surveillance régulière précédée d'un diagnostic sur la sécurité de l'ouvrage. Le diagnostic comporte des reconnaissances et différents calculs pour donner un avis sur la sûreté de l'ouvrage. Selon les conclusions, le barrage sera simplement surveillé, ou bien renforcé, ou même éventuellement démoli.

Ce travail est complexe car l'ouvrage à vérifier est généralement mal connu. En France, il a été entrepris sur de nombreux barrages, principalement sur les plus importants. La circulaire interministérielle du 14 Août 1970 a demandé que tous les barrages anciens intéressant la sécurité publique* fassent l'objet d'une procédure de révision spéciale. L'étude correspondante doit être soumise à l'avis du Comité Technique Permanent des Barrages. La plupart des barrages de hauteur supérieure à 20 m a ainsi fait l'objet d'études de diagnostic, et le cas échéant de confortement. Mais il reste un grand nombre de barrages de hauteur inférieure qui intéressent ou non la sécurité publique et qui n'ont pas fait l'objet de cette procédure de révision.

* Barrages intéressant la sécurité publique : barrages dont la rupture aurait des répercussions graves pour les personnes, quelle que soit leur hauteur. Tous les barrages de hauteur supérieure à 20 m sont considérés comme intéressant la sécurité publique.

Le présent manuel est donc destiné à ces barrages anciens, qu'ils intéressent ou non la sécurité publique.

Généralement, les propriétaires de ce type de barrage n'en possèdent qu'un ; ils ne sont donc pas sensibilisés aux problèmes de sécurité. Sauf exception, il ne faut pas alors espérer qu'ils prennent l'initiative de faire procéder à une révision de l'ouvrage.

Il importe donc que les services de contrôle de l'Etat exigent l'établissement de diagnostics lorsqu'ils sont nécessaires et qu'ils soient capables de juger rapidement de la nécessité d'une investigation.

Dans ces conditions, une approche pragmatique et efficace de la question de la sécurité des barrages anciens conduit à distinguer deux types d'intervention :

- le diagnostic rapide ;
- le diagnostic complet.

Le *diagnostic rapide* est à la charge du service de l'Etat. Il est établi à partir des documents existants et d'une visite de l'ouvrage et de l'occupation de la vallée en aval. Il ne comporte ni travaux de reconnaissance, ni essais, ni calculs lourds. Pour des ouvrages courants, le diagnostic rapide exige 1 à 3 journées de travail d'ingénieur incluant la visite du site, une discussion avec le propriétaire, l'observation des documents, le rapport de diagnostic. Dans bien des cas, un ingénieur moyennement expérimenté peut, même en quelques heures, conclure à la nécessité d'un diagnostic complet.

Le diagnostic rapide permet de dire si :

- l'ouvrage est susceptible d'intéresser la sécurité publique ;
- le barrage ne pose pas de problème ;

- le barrage nécessite des travaux d'entretien ;
- le barrage nécessite un renforcement du dispositif d'auscultation ;
- un diagnostic complet doit être établi ;
- le barrage nécessite des travaux de réparation ;
- le barrage doit être vidé sans délai, totalement ou partiellement.

Le *diagnostic complet* est établi par un bureau d'étude expérimenté et à la charge du maître d'ouvrage. Il comporte :

- une visite détaillée de l'ouvrage éventuellement avec retenue pleine et avec retenue vide ;
- si nécessaire des reconnaissances (sondages, géophysique...) et des essais de laboratoire ;
- des vérifications (débit de la crue à considérer, capacité des organes d'évacuation, stabilité du barrage) ;
- éventuellement le calcul de l'onde provoquée par un effacement du barrage.

Il doit conclure sur la sûreté de l'ouvrage et sur la nécessité de le conforter. Il doit également décrire le type de confortement envisageable, sans toutefois consister directement en un avant projet.

Le présent document présente et illustre une méthodologie de diagnostic rapide des barrages selon leur type :

- barrages en remblai (chapitre **B**) ;
- barrages poids (chapitre **C**).

Dans le chapitre **A**, sont traités les points communs à tous les types de barrages (évacuateurs de crue...).

Commentaire sur la définition d'un barrage ancien.

Bien entendu sont considérés comme anciens tous les barrages qui ont vieilli. Force est de constater que ce qui a le plus vieilli c'est le mode de conception et de dimensionnement, tant de la structure que des organes hydrauliques. Les matériaux aussi vieillissent, avec dissolution des liants, fatigue des maçonneries, tassements, saturation, entraînement de fines... On peut considérer en 1992 qu'un barrage ancien est un ouvrage construit avant 1970 environ ou même un barrage plus récent si son constructeur ou son concepteur n'avaient pas la compétence nécessaire.

Les recommandations du présent guide sont à appliquer strictement lorsque le barrage intéresse la sécurité publique. Lorsque ce n'est pas le cas, il pourra être utile d'adapter les recommandations à la taille de l'ouvrage et au volume stocké.

**GUIDE POUR LE DIAGNOSTIC RAPIDE
D'UN BARRAGE EXISTANT**

A- TOUS BARRAGES

par G. Degoutte et B. Chastan

B- BARRAGES EN REMBLAI

C - BARRAGES POIDS

A - TOUS BARRAGES

Ce chapitre comporte les éléments qui sont communs à tous les types de barrages, et en particulier, les recherches de documents, le diagnostic de l'évacuateur des crues et l'évaluation des conséquences d'une rupture.

I - TYPE ; DESCRIPTION.

1.1) Type.

Il est en principe facile de classer le barrage à étudier dans l'un des quatre types suivants :

- barrage en remblai ;
- barrage poids ou poids voûte ;
- barrage voûte ;
- barrage à contreforts ou multivoûtes.

Il existe en outre des barrages mixtes. Le premier type de barrage mixte ne pose guère de problème : il s'agit d'ouvrages composés dans le sens de leur longueur de plusieurs tronçons de types différents. C'est le cas des barrages poids en maçonnerie prolongés par deux remblais en terre.

Plus complexe est le cas de barrage à profil mixte. Il existe par exemple :

- des barrages poids en maçonnerie confortés par un remblai aval ;
- des barrages en terre dont le parement amont est renforcé par des contreforts en maçonnerie.

Pour les barrages mixtes, il faudra dans ce cas se reporter aux chapitres correspondants en veillant à bien prendre en compte le rôle de chaque partie, dans la tenue de la structure d'une part, dans son étanchéité d'autre part.

Le présent guide est limité aux barrages en remblai, aux barrages poids ou poids voûte qui constituent l'essentiel du parc des barrages anciens de hauteur faible ou moyenne.

1.2) Evacuateurs.

Si l'on excepte les quelques retenues dont le remplissage est complètement maîtrisé, un barrage est toujours équipé d'un évacuateur de crue. Quelques barrages poids ou poids-voûte, en maçonnerie ou en béton, sont entièrement déversants : l'évacuateur de crue est alors le barrage lui-même.

L'importance de l'évacuateur est très variable d'un type de barrage à l'autre :

- pour un barrage en remblai, l'évacuateur est absolument fondamental, car un tel barrage ne résiste pas aux déversements ;
- un barrage poids en maçonnerie ou en béton résiste habituellement bien aux déversements ; cependant, surtout lorsque sa hauteur est faible, sa stabilité est fortement liée au niveau atteint par les plus hautes eaux ; en outre, un déversement peut dégrader un remblai de confortement aval et diminuer la stabilité de l'ouvrage ;

- un barrage voûte résiste habituellement bien aux déversements ; c'est le type de barrage qui tolère le mieux une sous-évaluation de la crue de projet ;

- un barrage à contreforts est à considérer de ce point de vue comme une variante du barrage poids.

Le paragraphe II traite du diagnostic de l'évacuateur de crue.

1.3) Surélévation et modification.

Les barrages peuvent avoir subi des modifications pour plusieurs raisons.

(1) Un *confortement* à la suite d'observation de désordres a pu être réalisé de diverses manières, parfois il y a fort longtemps et de manière plus ou moins bien visible. On peut distinguer :

- les renforcements par ajouts de matériaux : remblai à l'aval d'un barrage poids, contreforts en maçonnerie, injection dans le corps d'un barrage poids... ;

- les renforcements par substitution de matériaux : construction de contreforts maçonnés placés en redans dans le parement amont d'un barrage en terre, ainsi le barrage de Torcy-Vieux destiné à la navigation a été conforté en 1838 après avoir été rehaussé de 4 m en 1825 ;

- le confortement par réalisation de drains dans le barrage ou sa fondation ;

- l'amélioration de l'étanchéité : rejointoiements, injections, tapis d'argile...

- (11) Les barrages en remblai ou les barrages poids ont souvent été *rehaussés*. Il n'est pas certain que ce travail ait été fait par "un homme de l'art", et que l'on ait été bien attentif aux nouvelles conditions de stabilité d'un barrage poids, ou de drainage d'un barrage en terre...
- (111) La *gestion* de la retenue peut être modifiée, souvent dans le sens d'une plus grande sollicitation de l'ouvrage : relèvement du niveau d'exploitation et accroissement de la fluctuation annuelle.

1.4) Archives ; témoignages.

La lecture des **documents d'archives** est toujours d'une très grande utilité. On peut y trouver les renseignements concernant l'ouvrage et son environnement et aussi concernant sa vie :

- nature des matériaux utilisés ;
- mode de mise en oeuvre ;
- nature des fondations, traitement des contacts, réalisation de "bêches d'ancrage"... ;
- incidents de construction, tels que crue de chantier ;
- incidents à la mise en eau ;
- confortements, rehaussements de déversoirs ou abaissements, existence de pertuis aujourd'hui abandonnés, suivis de fissures...;
- parfois même, photographies prises en cours de chantier.

Il est particulièrement utile de savoir dans quel but le concepteur a prévu certains aménagements : pourquoi telle zone est-elle particulièrement drainée ?, etc...

La recherche des archives doit toujours être effectuée avec soin. Parmi les possibilités, signalons :

- les archives et dossiers du maître de l'ouvrage, d'un ancien président... ;
- les archives de la DDAF ou de la DDE, de la mairie, du constructeur... ;
- les archives départementales ;
- les archives nationales.

Les **témoignages** doivent aussi être recherchés. Ainsi, pour un barrage en maçonnerie construit en 1932 sur l'Hérault, un ancien s'est rappelé avoir vu des traces blanchâtres à l'aval du barrage dès son premier remplissage. Ce phénomène a ensuite pu être attribué au délavage du liant à la chaux.

Enfin, des études plus récentes peuvent être obtenues concernant l'**hydrologie** du cours d'eau. Elles peuvent permettre d'améliorer la connaissance du débit de crue pour des fréquences faibles. On pensera en particulier à rechercher ces documents auprès des DDAF, DDE, DIREN ou Agences de Bassin, dans certains cas auprès de EDF.

II - CAPACITE DES EVACUATEURS DE CRUE.

La révision de la capacité des organes évacuateurs de crue est tout à fait fondamentale, pour les barrages en terre tout particulièrement, mais aussi pour tous les autres types.

Une enquête de la C.I.G.B. (Commission Internationale des Grands Barrages) a montré que 37 % des 75 ruptures de barrages recensées et survenues aux USA, au Japon et en Europe entre 1900 et 1985 étaient dues à leur submersion [1].

Dans la première tranche de l'enquête CEMAGREF [2] portant sur 18 départements et 117 barrages susceptibles d'intéresser la sécurité publique, 23 % ont des déversoirs dont la capacité d'évacuation est visiblement sous-dimensionnée. 80 % de ceux-ci ont été construits avant 1960.

2.1) Causes d'une insuffisance de capacité de l'évacuateur.

Les principales causes d'une insuffisance de capacité d'un évacuateur sont :

- une modification volontaire consistant généralement à rehausser le seuil déversant (voir III) ;
- un fonctionnement défectueux dû à l'obstruction du seuil par des corps flottants, ou à l'obstruction du coursier par un effondrement ou à un dysfonctionnement de vannes ou clapets (voir III) ;
- une capacité insuffisante, soit par sous-estimation de la crue de projet, soit du fait d'un calcul hydraulique erroné (voir 2.2), soit du fait de modifications d'occupation du sol dans le bassin versant.

2.2) Révision de la crue de projet.

Il est utile de revoir la crue de projet d'un barrage construit depuis plus de 10 à 20 ans pour deux raisons essentielles :

- on dispose à ce jour de séries de données hydrologiques plus longues ;

- les méthodes d'estimation des crues ont fait un progrès sensible avec l'apparition de la méthode du gradex et avec l'établissement de formules synthétiques d'estimation des crues rares.

La fréquence de la crue de projet retenue est toujours très faible :

- le Comité Technique Permanent des Grands Barrages admet classiquement que l'on doit justifier un barrage en béton ou en maçonnerie pour la crue cinq-millénaire et un barrage en remblai pour la crue décennale ;

- pour un barrage de hauteur plus faible, il n'est pas raisonnable d'envisager une crue de projet plus faible que la crue millénaire.

2.2.1) Formules synthétiques pour l'estimation de la crue millénaire.

Une synthèse nationale réalisée par EDF en 1989 [3] a conduit à une formule synthétique valable pour les bassins versants de surface comprise entre quelques km² et quelques milliers de km².

Elle donne le débit instantané de la crue millénaire Q en m³/s par la relation :

$$Q = a S^{0,72} ;$$

où S est la surface du bassin versant en km² et a un paramètre donné par le tableau ci-après pour les 3 zones suivantes :

. **zone I** : les bassins affluents de la Loire Inférieure (Vienne, Creuse...) situés au nord du Massif Central, ceux de la Saône, de la Moselle, de la Bretagne ;

. **zone II** : les bassins des Pyrénées Occidentales, Centrales, de l'Aude et de l'Ariège, de la Dordogne et du Lot, les bassins de la Durance, du Fier et de l'Arve, des Dranses, de l'Isère ;

. **zone III** - les bassins de la Haute Loire, des Cévennes, du Tarn, des affluents rive droite du Rhône à l'aval de Lyon (Eyrieux, Ardèche...), des Alpes-Maritimes, de la Corse.

Zone	a	Fourchette à 90 %	Fourchette à 70 %
I	4,05	3,07 - 5,36	3,4 - 4,8
II	7,4	5,2 - 10,4	5,9 - 9,2
III	16,4	9,1 - 29,7	11,3 - 23,9

Cette formule n'est pas applicable aux bassins versants inférieurs à quelques kilomètres carrés. Elle ne donne qu'un ordre de grandeur, qu'il faut affiner par une étude locale s'il existe une station limnigraphique sur le cours d'eau ou régionale à partir des données de stations proches. Cet ordre de grandeur est à considérer pour porter un premier jugement sur la capacité de l'évacuateur de crue.

2.2.2) Laminage de la crue.

Hormis pour les barrages écrêteurs de crue, la vérification d'un évacuateur de crue est classiquement faite pour une retenue pleine (jusqu'au niveau normal des eaux) lors de l'arrivée de la crue. Grâce à l'effet de laminage par la retenue, le débit de pointe de la crue évacuée est inférieur à celui de la crue de projet.

Le calcul de l'effet du laminage relèvera cependant d'un diagnostic complet. Dans le cadre du diagnostic rapide, il faut retenir que, en général, le bénéfice du laminage est comparable à l'incertitude sur l'estimation du débit de la crue de projet (il faut des superficies de plan d'eau supérieures à environ 1 % de la superficie du bassin versant pour que le laminage soit significatif).

Dans le cas particulier des barrages ayant une fonction d'écrêtement des crues, les retenues sont maintenues vides ou partiellement vides. La vérification de la capacité de l'évacuateur de crue nécessite alors impérativement un calcul de laminage qui relèvera d'un diagnostic complet. Ce cas se présente d'ailleurs rarement car les barrages écrêteurs de crue français sont relativement récents.

2.3) Capacité de l'évacuateur de crue.

Dans le cadre du diagnostic rapide, on se limitera à étudier la relation charge-débit au droit de la section qui contrôle l'écoulement. Cette section de contrôle est généralement :

- le déversoir situé à l'entrée d'un évacuateur de surface ;
- la section la plus étroite d'un évacuateur en charge (puits ou siphon).

2.3.1) Evacuateur à surface libre.

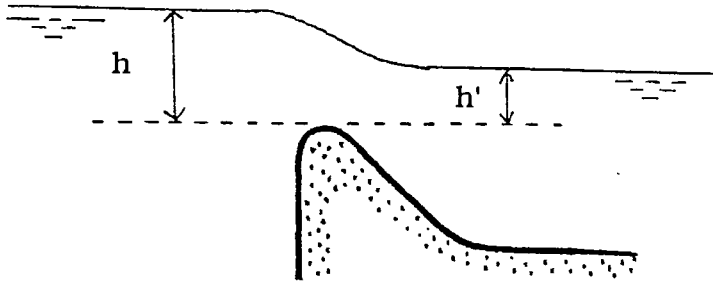
La capacité du déversoir qu'il soit à entonnement frontal ou latéral est donnée par :

$$Q = \mu \sqrt{2g} L h^{3/2} \text{ avec } \begin{aligned} \mu &= \text{coefficient de débit ;} \\ g &= 9,8 \text{ m}^2/\text{s ;} \\ L &= \text{longueur du seuil déversant en m ;} \\ h &= \text{charge en m.} \\ Q &= \text{capacité en m}^3/\text{s.} \end{aligned}$$

Le coefficient de débit μ croît avec la charge. Pour une charge élevée correspondant à la crue de projet, μ varie de :

- 0,36 à 0,40 pour un seuil à crête vive ;
- 0,41 à 0,45 pour un seuil à crête arrondie ;
- 0,45 à 0,52 pour un seuil profilé de type Creager [4].

Cette formule suppose que l'écoulement est dénoyé, ce qui est vérifié si la hauteur d'eau h' à l'aval du seuil mesuré au-dessus du seuil ne dépasse pas les $2/3$ de la charge ($h' < 2h/3$).



En cas de doute, le calcul du tirant d'eau normal dans le chenal situé à l'aval du seuil permettra une vérification rapide de cette condition.

Si l'écoulement est noyé, le coefficient de débit est diminué. Cette circonstance conduira en principe à recommander une vérification complète de l'écoulement dans le cadre d'un diagnostic complet.

Ce type de problème d'ennoiement se produit lorsqu'existe un goulot d'étranglement en aval du seuil : rétrécissement brutal d'un canal à surface libre, passage en charge dans un pertuis ou des conduites.

2.3.2) Evacuateur en charge.

La capacité est donnée par la formule : $Q = \alpha S \sqrt{2gH}$

avec :

α = coefficient de débit ;

S = section du contrôle en m^2 ;

H = différence de charge entre la retenue et la surface libre aval.

Q = capacité en m^3/s .

Le coefficient de débit a dépend de l'ensemble de pertes de charge en amont du contrôle. On admettra ici $\alpha = 0,6$ [référence 5 : chapitre 9].

2.3.3) Diagnostic sur la capacité de l'évacuateur.

Les formules ci-dessus permettent de calculer H connaissant Q ou vice-versa.

1er cas : barrage en remblai.

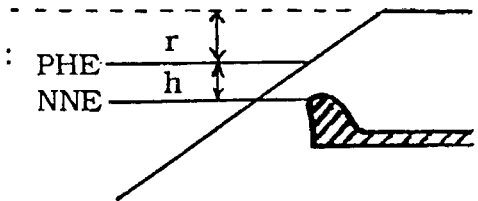
On commence par calculer la revanche r au dessus des plus hautes eaux. On calcule ensuite la charge h admissible, c'est-à-dire la différence entre la cote des plus hautes eaux (PHE) et le niveau normal des eaux (NNE) :

$$h = z_c - z_s - r \text{ où}$$

z_c = cote de la crête ;

z_s = cote du seuil ;

r = revanche.



Enfin on calcule la capacité correspondante que l'on compare à la crue de projet.

Si la capacité est insuffisante on sera amené à recommander une vérification complète (étude hydraulique, laminage et calcul hydraulique de l'évacuateur de crue).

2ème cas : barrage poids déversant.

Dans ce cas au contraire, on part de l'estimation du débit Q de la crue de projet et on déduit la charge maximale h .

Pour un tel ouvrage, la notion de capacité de l'évacuateur de crue n'a guère de sens. Par contre, la valeur de la charge maximale est à considérer dans le calcul de stabilité (voir chapitre C, paragraphe V).

3ème cas : barrage en béton ou en maçonnerie non déversant.

Dans ce cas on procèdera en deux étapes.

En première étape les formules précédentes permettent de calculer la capacité de l'organe évacuateur de crue. La charge à prendre en compte (h pour un évacuateur de surface ou H pour un évacuateur en charge) est donc relative au niveau de la crête du barrage, soit :

$$h = z_c - z_s, \text{ où } \begin{array}{l} z_c = \text{cote de la crête (parapets éventuels inclus);} \\ z_s = \text{cote du seuil.} \end{array}$$

ou bien $H = z_c - z_{av}$, où z_{av} est la cote de la surface libre aval.

Si cette capacité est supérieure à la crue de projet, le diagnostic de la capacité de l'évacuateur est terminé.

Si au contraire, cette capacité calculée est inférieure à la crue de projet, la deuxième étape de calcul consiste à calculer la cote atteinte pour cette crue en considérant la crête du barrage comme un seuil déversant dont le coefficient de débit est relativement médiocre (de l'ordre de 0,32). La cote ainsi obtenue est à considérer dans le calcul de stabilité (voir chapitre C, paragraphe V).

Contrairement à un barrage en terre, un barrage en béton ou en maçonnerie résiste au déversement, de même en général que sa fondation. Si la stabilité n'est pas en cause, on pourra admettre ce type de situation pour un épisode de crue rare. Dans le cas d'un ouvrage de type poids remblayé à l'aval, il ne faudra cependant pas faire intervenir le massif aval dans le calcul de stabilité à cause du risque d'affouillement.

III - VISITE DU BARRAGE ET TEMOIGNAGES.

3.1) Points à noter, communs à tous les types de barrages.

La visite du barrage effectuée dans le cadre du diagnostic rapide a pour double rôle :

- de compléter ou confirmer les renseignements disponibles dans le dossier d'origine ;
- de se rendre compte de l'état de l'ouvrage et de ses abords.

Le tableau ci-après détaille l'ensemble des points à observer, communs à tous les types de barrage. Chaque point fait ensuite l'objet d'un commentaire en 3.2 de manière à guider la visite.

BARRAGE.....

Cote du plan d'eau par rapport au Niveau Normal des Eaux :

Points à observer	Présence ou absence	Renseignements à noter (état, position,nbre..)	Commentaires
<p>1. Evacuateur(s)</p> <p>1.1. bassin versant 1.2. type(s) 1.3. surélévation d'un seuil libre 1.4. obstacles sur le seuil libre 1.5. coursier</p> <p>1.6. contrôle de l'écoulement 1.7. dissipateur 1.8. vannes, clapets 1.9. accès aux organes mobiles 1.10. tenue des bajoyers</p> <p>2. Vidanges</p> <p>2.1. tuyau 2.2. vannes</p> <p>3. Retenue</p> <p>3.1. instabilité de versants 3.2. constructions en bordure</p> <p>4. Aval du barrage</p> <p>4.1. habitations, voies de communication</p> <p>5. Surveillance et gestion</p> <p>5.1. gardiennage 5.2. gestion 5.3. le registre de l'exploitant 5.4. mesures d'auscultation</p> <p>6. Evènements marquants.</p> <p>6.1. modifications 6.2. confortements 6.3. vidange complète 6.4. très fortes crues 6.5. séismes</p>			<p>boisé ou en prairies... en charge, à surface libre en dur ; grilles, planches pieds de passerelle, piquets.. risques d'obstruction, d'érosion goulots d'étranglement érosion manoeuvrables, secours praticable en forte crue ? fissures, végétation...</p> <p>visitable ? corrosion... manoeuvrables, réparables?</p> <p>stabilisées? risque d'extension risques d'inond. (par l'aval)</p> <p>intérêt vis à vis de la sécurité publique</p> <p>sur place? périodicité des visites manuelle ? automatisée ?</p> <p>périodicité</p> <p>surélévation crête date ; motif ? archives motif ? comportement de l'évacuateur témoignages</p>

3.2) Guide pour une visite de diagnostic rapide.

Les numéros entre parenthèses correspondent à ceux du tableau synthétique, page 30.

(1.3) Le **rehaussement d'un déversoir de crue** est une opération malheureusement extrêmement fréquente, principalement pour les barrages construits par des particuliers. Ainsi, une enquête réalisée en 1989 dans le Sud Ouest de la France a montré que, sur 149 barrages en terre de moins de 20 m de hauteur construits entre 1970 et 1988, 90 % avaient été illégalement rehaussés [6].

Ces rehausses sont soit des batardeaux en planche, soit des grilles destinées à retenir les poissons, soit même des constructions en dur. Les grilles se colmatent très vite par des feuilles et se comportent en pratique comme des rehausses pleines. Grilles et batardeaux théoriquement amovibles se révèlent pratiquement toujours inamovibles lorsqu'une crue survient !

(1.4) Les colmatages par les branches ou arbres se produisent lorsque le seuil déversant présente des **obstacles** : piliers de passerelles, 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 pour ne pas entraîner un relèvement du plan d'eau lorsque des arbres y sont piégés. La technique de la drome peut également être envisagée : il s'agit d'un câble équipé de flotteurs ancré entre des points fixes du parement amont ou de la berge, restant à la surface du plan d'eau en cas de fluctuation de niveau et maintenant les corps flottants à distance de l'évacuateur.

(1.5) Les risques d'obstruction du coursier par chute de pierres, ou glissement de terrain sont faciles à diagnostiquer. Selon l'emplacement, ils risquent de provoquer un ennoiemment par l'aval du seuil déversant. Dans le cas d'un barrage en terre, ils peuvent aussi provoquer une érosion du parement aval. Les mesures peuvent être faciles à mettre en oeuvre 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 crue 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 un risque d'érosion régressive pouvant évoluer jusqu'au contournement complet du barrage. L'observation de ce matériau et de son entaillement permet de porter un jugement sur ce risque. Un suivi régulier par des prises de vue est à recommander en cas de doute. Mais si une érosion régressive importante est proche du seuil déversant marquant le départ du coursier, une intervention d'urgence est à recommander : vidange de la retenue et(ou) confortement provisoire du seuil par des enrochements.

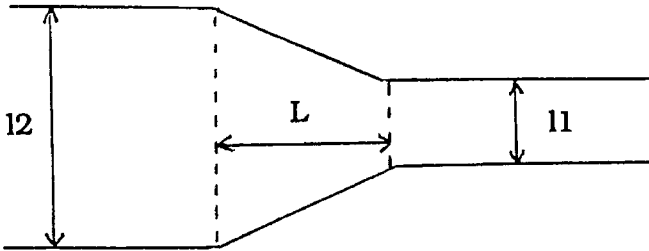
(1.6) Le contrôle hydraulique de l'écoulement est situé en règle générale au droit du seuil déversant. Mais, dans certains cas, un chenal déversant incorrectement dimensionné provoque un ennoiemment du seuil pour les débits élevés (voir §. 2.3.1). L'écoulement est alors moins performant, et la cote du plan d'eau est supérieure à la cote espérée. Une telle circonstance se produit lorsque :

- le plafond du chenal est trop haut par rapport à la crête du seuil (voir 2.3.1) ;
- il existe un convergent trop brusque ou un goulot d'étranglement.

Lors de la visite de diagnostic, ou à l'aide d'un plan, il est assez facile de juger si un convergent est trop brutal. On recommande habituellement [4] :

$$L > 2,5 (12 - 11).$$

Pour des rétrécissements plus brutaux, le convergent peut entraîner une modification de la section de contrôle et un ennoiment du seuil. Dans les cas douteux, un calcul hydraulique complet devra être recommandé.



La présence d'un goulot d'étranglement est assez facile également à diagnostiquer sur le terrain. On en rencontre assez souvent à l'occasion d'un passage routier au-dessus du coursier.

(1.7) 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 circonstances peuvent être dangereuses 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 manoeuvre brutale d'une vanne. Son observation est donc nécessaire.

(1.8et1.9) Le dysfonctionnement d'une vanne ou d'un clapet mobile rehaussant un ouvrage déversant doit toujours être envisagé. Les conséquences peuvent être graves pour la tenue de l'ouvrage en cas de blocage en position fermée. Elles peuvent être graves pour les populations aval en cas d'une ouverture brutale inopinée. Il faut, à l'occasion d'un diagnostic rapide, vérifier les possibilités de bon fonctionnement, y compris des fonctionnements de secours en manuel. Il faut aussi être attentif aux possibilités de fonctionnement effectif dans l'hypothèse d'une forte crue et vérifier :

- la possibilité d'accès hors d'eau pour opérer une manoeuvre manuelle ;
- la situation hors d'eau des organes électriques ;
- l'existence d'une protection contre la foudre des moteurs électriques (penser en particulier que la concomitance d'une forte crue et de la foudre est vraisemblable).

De ce point de vue, les remèdes peuvent être un doublement des liaisons, un groupe de secours, des aménagements d'accès... Des essais périodiques doivent être prévus dans le manuel de consigne du barrage.

(1.10) 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. Le risque de rupture peut généralement être diagnostiqué en surveillant les évolutions. Aussi, la pose d'appareils de contrôle est-elle généralement la seule mesure d'urgence à conseiller. Dans le cas de bajoyers en maçonnerie, l'état d'entretien est facile à diagnostiquer et des travaux de rejointoiement et d'enlèvement de la végétation sont éventuellement à conseiller.

(2.1) 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 manoeuvre intempestive n'est possible pendant la visite, et que l'atmosphère est respirable sans danger).

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

(2.2) Les **vannes de vidange** doivent également être manoeuvrées à l'occasion d'une visite de diagnostic. 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 manoeuvre de vannes depuis plusieurs années. On risquerait dans certains cas de 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. La situation normale est celle où la vanne de garde est maintenue levée. L'essai consiste alors à fermer la vanne de garde puis à ouvrir la vanne de vidange.

Il faut insister sur la nécessité impérieuse d'une manoeuvre périodique de ces organes et sur le soin à porter au graissage des parties mobiles.

(3.1) Les problèmes de **stabilité des versants** en limite de la cuvette sont relativement rares dans le cas des barrages anciens de petite et moyenne dimension. On devra y être

attentif dans le cas des versants à forte pente (traces de décrochements, arbres inclinés, témoignages...).

(3.2) Dans certaines régions à relief peu marqué, il peut y avoir un risque d'inondations de **lieux habités situés en bordure de la retenue**. Ce problème peut survenir si une forte crue s'accompagne d'une obstruction du déversoir par des arbres ou branches.

(4.1) Les lieux habités ou les voies de communication dans la vallée en aval du barrage peuvent être menacées en cas de rupture. Lors du diagnostic rapide une visite de la vallée aval et la consultation de cartes récentes permet d'avoir une idée sur ce risque. Il est difficile de donner une réponse rapide à la question "ce barrage intéresse-t-il la sécurité publique". En cas de doute on aura l'une ou l'autre des deux attitudes suivantes :

- recommander l'accomplissement d'un calcul de simulation d'effacement d'un barrage ;

- effectuer soi-même une étude rapide, en application de la méthode simplifiée proposée par le CEMAGREF et résumée au paragraphe V ci-après.

Deux cas extrêmes dispensent d'une étude même rapide :

- il n'existe aucune habitation ou route sur plusieurs kilomètres en aval d'une retenue de faible capacité ;

- il existe au moins une habitation en fond de vallée à faible distance du barrage.

Enfin, il est utile de mettre en garde contre une fréquente confusion : l'appréciation du risque vis à vis de la sécurité publique doit être complètement indépendante de la confiance que l'on a dans l'ouvrage lui-même.

(5.1) La présence d'un **gardien** sur place est une bonne garantie qu'un minimum de surveillance visuelle est effectuée. Les barrages gardiennés sont en règle générale des barrages qui sont régulièrement auscultés (voir 5.4).

(5.2) Le **gestionnaire** du barrage peut être le gardien éventuel ou bien une personne chargée de certaines manoeuvres de vannes. Il convient d'effectuer la visite de diagnostic en présence du gardien ou du gestionnaire du barrage et de noter la nature de ses interventions et leur périodicité.

(5.3) Le **registre de l'exploitant** est obligatoire pour les barrages intéressant la sécurité publique. S'il est correctement tenu à jour, on pourra y trouver des informations utiles sur des aménagements, des réparations ou des incidents.

(5.4) Noter également la **périodicité des mesures d'auscultation** éventuelles.

. Pour les mesures de piézométrie, de pression et de débit un ordre de grandeur raisonnable est la lecture mensuelle. Pour les barrages n'intéressant pas la sécurité publique, on peut tolérer des mesures écartées au grand maximum de 2 ou 3 mois.

. Pour les mesures de déformation par pendules, extensomètres, fissuromètres, vinchons... la périodicité habituelle est de 1 mesure tous les quinze jours. Elle ne devrait pas dépasser 1 mesure tous les 2 mois dans le cas de barrages n'intéressant pas la sécurité publique.

. Règlementairement, les mesures topographiques doivent être effectuées 2 fois par an (à la rigueur 1 fois par an) pour les barrages intéressant la sécurité publique. Pour les barrages poids équipés de pendules en bon état de marche les mesures topographiques ne sont pas indispensables. D'ailleurs, d'une manière générale, les mesures topographiques ne sont pas la première opération à recommander pour un barrage ancien dont

l'auscultation a été arrêtée, s'il n'y a pas de désordre apparent. Il sera bien plus important de recommander prioritairement la reprise des mesures hydrauliques.

Bien entendu on augmentera notablement le rythme des mesures en cas de problème particulier (exemple : évolution des débits de fuite non liée à une variation de niveau de la retenue).

- (6) A l'occasion de la visite du barrage ou bien par des recherches de témoignages, on cherchera à connaître les grands **événements** qui ont pu marquer la vie du barrage.
- (6.1) **Les modifications importantes** telles que surélévation du barrage ou seulement de son déversoir de crue sont indispensables à connaître (témoignages, archives, signes visibles).
- (6.2) **Confortements** ou réparations, ou complément à un dispositif d'auscultation : dans ces cas les raisons qui ont conduit à ces travaux sont importantes à connaître.
- (6.3) Opération de **vidange complète** de la retenue : la connaissance des observations qui en ont découlé est importante.
- (6.4) **Très fortes crues** : les épisodes les plus rares sont bien marqués dans les mémoires et il convient d'essayer d'avoir des renseignements fiables sur les niveaux maximaux atteints par l'eau, sur le fonctionnement des organes dits annexes...
- (6.5) **Séismes** : ces événements sont également bien présents dans les mémoires, mais nous ne connaissons pas d'exemple de barrages français victimes de désordres à la suite d'un séisme, y compris dans les départements d'Outre-mer.

IV - MESURES IMMEDIATES.

Les mesures suivantes peuvent être proposées sans attendre un éventuel diagnostic complet de sécurité du barrage :

- enlèvements d'obstacles sur un seuil déversant, principalement lorsque le bassin versant est boisé ;
- entretien des parties métalliques (tuyaux, crémaillères, vannes...) ;
- sécurité des installations électriques , y compris contre la foudre ;
- aménagement des accès praticables lors des fortes crues ;
- pose d'appareils de contrôle d'écartements de joints ou de fissures ;
- reprise de mesures d'auscultation interrompues ;
- vidange de la retenue sans délai.

V - EVALUATION DES CONSEQUENCES D'UNE RUPTURE.

Ce chapitre est consacré au diagnostic rapide du risque encouru à l'aval d'un barrage et lié à l'onde de submersion produite par son effacement.

Il y a un danger potentiel pour la sécurité publique dès qu'une maison, un local collectif ou une route fréquentée sont susceptibles d'être inondés. On peut distinguer les inondations durables avec des hauteurs d'eau éventuellement faibles et les inondations brèves avec des hauteurs d'eau fortes ou des vitesses élevées.

Dans de nombreux cas, des agglomérations (éventuellement de petite taille) sont situées dans le lit majeur du cours d'eau et jusqu'en bordure du lit mineur. Le diagnostic est dans ces cas relativement clair ; il repose sur l'examen du dimensionnement du lit mineur et de sa capacité à évacuer les

débites de rupture, dont il faut avoir au préalable une estimation. L'estimation du tirant d'eau maximal atteint permet d'apprécier les débordements éventuels et les submersions induites dans l'agglomération. Cet examen se fait au regard du temps d'arrivée de l'onde, qu'il faut avoir également déterminé.

Les autres cas, généralement plus compliqués, concernent l'habitat diffus, qu'il soit permanent ou temporaire, individuel ou collectif, à usage domestique ou professionnel et les voies de circulation, généralement installées sur des ouvrages en travers. Dans ces cas, une estimation des débits et tirants d'eau atteints au droit des sections concernées est nécessaire. Elle doit être examinée au regard des vitesses de l'écoulement, des temps d'arrivée de l'onde et des durées de submersion.

Enfin, les ouvrages en travers capables de résister au flot provoquent, à leur amont, des surélévations dont il est faut tenir compte.

Ainsi, les paramètres susceptibles de jouer un rôle important vis à vis de la sécurité des personnes sont la hauteur de submersion, le temps d'arrivée de l'onde, la vitesse d'écoulement et la durée de submersion.

Historiquement, l'estimation des risques a d'abord concerné les grands barrages, pour lesquels les paramètres les plus significatifs sont certainement le temps d'arrivée de l'onde et les tirants d'eau maximaux. Les autres paramètres sont moins utilisés et ne sont d'ailleurs pas d'un accès facile. C'est le cas de la durée de submersion, qui pourrait présenter un intérêt pour le traitement des retenues moyennes à faibles.

Enfin, une corrélation directe est souvent admise entre le seul tirant d'eau et le risque (par exemple : 20 cm de tirant d'eau = risque faible ; 80 cm = risque moyen ; 1,20 m = risque fort). Cette analyse sommaire peut être utilement couplée à celle du champ des vitesses, pour les petits et moyens barrages. Par

exemple, un tirant d'eau de 50 cm avec une vitesse de 3 m/s représente un risque fort pour la sécurité des personnes.

Nous mentionnons brièvement ci-dessous, les moyens actuels disponibles pour estimer les différents paramètres.

5.1) Les possibilités de calcul.

Seul un calcul complet de génération de l'onde au niveau du barrage, puis de propagation de cette onde vers l'aval, permet de quantifier correctement l'ensemble des paramètres essentiels cités. Ce calcul hydraulique complet est effectué à l'aide de codes de calcul spécifiques. Ceux-ci sont d'un emploi assez délicat et nécessitent la connaissance de données nombreuses et précises concernant la retenue, le barrage et la vallée. Développés pour s'appliquer à des écoulements monodimensionnels rapidement transitoires, ils sont eux-mêmes d'autant plus imprécis que des effets bidimensionnels apparaissent (vallées larges à faibles pentes, variations très brusques de géométrie ou de topographie de la vallée...).

Des méthodes simplifiées, évidemment moins précises que les calculs ci-dessus, existent. Elles ignorent généralement la durée de submersion mais permettent d'accéder aux paramètres principaux, le tirant d'eau maximal et le temps d'arrivée de l'onde. L'une d'entre elles a été mise au point en 1978 par le CEMAGREF [7]. Elle repose sur le calcul d'expressions analytiques de type monôme et sur l'utilisation d'abaques. Elle requiert les mêmes types de données que celles nécessaires au calcul complet mais en nombre et précision réduits. La précision globale de ces méthodes varie classiquement de 30 à 60 % avec des variations locales qui peuvent être beaucoup plus importantes. Elles permettent d'obtenir les temps d'arrivée de l'onde ainsi que les tirants d'eau et les débits maximaux dans un certain nombre de sections sélectionnées.

Hors tout calcul et utilisation d'abaque, il n'existe pas de méthode générale, même imprécise, permettant d'obtenir les variables intéressantes citées, avec une erreur quantifiable. Dans ces conditions, le parti est pris ici, d'une part, de donner quelques indications sur la physique des phénomènes, permettant d'en analyser grossièrement le déroulement, et d'autre part, de donner quelques ordres de grandeur utiles au diagnostic du risque et enfin de présenter en annexe une des méthodes simplifiées.

Un logiciel fonctionnant sur micro-ordinateur compatible PC et reprenant les mêmes approximations que cette méthode simplifiée par abaques existe actuellement au CEMAGREF. Des études sont en cours pour en simplifier l'utilisation et en améliorer la précision [8].

5.2) Les données nécessaires et les incertitudes.

5.2.1) Rupture du barrage.

La rupture du barrage peut être instantanée ou progressive, selon la nature du matériau. La rupture des ouvrages en béton ou en maçonnerie est instantanée. Par contre, la ruine des barrages en remblais, consécutive à des phénomènes d'érosion, est progressive. Elle intervient, soit par formation et développement d'un renard hydraulique, soit par surverse sur la crête. La rupture progressive donne naissance à une brèche dans le barrage et génère un hydrogramme au droit du site. Son maximum est inférieur au débit maximal atteint en cas de rupture instantanée avec la même brèche.

La rupture totale et instantanée d'un ouvrage reste l'hypothèse de rupture de loin la plus pessimiste. Justifiable pour les barrages en béton, elle est sévère pour les ouvrages en terre ou en enrochements. La méthode sommaire décrite ci-après en 5.3 suppose néanmoins une rupture instantanée, mais éventuellement partielle.

5.2.2) Propagation dans la vallée.

La propagation dans la vallée de l'onde engendrée au barrage induit globalement son amortissement et son étalement. Cet amortissement et cet étalement dépendent des caractéristiques globales de la vallée (forme, pente, rugosité moyennes), comme des caractéristiques plus locales (singularités topographiques, rugosité). Par ailleurs, ces caractéristiques ne sont pas intrinsèques mais sont, dans une certaine mesure, relatives aux caractéristiques de l'onde et peuvent dépendre de la taille de la retenue ou de la distance au barrage de la section considérée. Ainsi un ouvrage en travers (pont, remblai) proche d'un grand barrage, est-il balayé par l'onde de rupture, sans incidence notable sur sa propagation ; le même ouvrage, situé à proximité d'une petite retenue, peut résister au flot et influencer significativement son écoulement (surélévation des niveaux d'eau à l'amont de l'ouvrage).

La description des caractéristiques géométriques et hydrauliques de la vallée est donc un point technique important, rendu d'autant plus délicat que l'on s'intéresse aux barrages d'importance moyenne à faible, pour lesquels la carte topographique au 1/25 000 offre une précision insuffisante.

5.3) L'estimation concrète du risque.

Comme indiqué ci-dessus, le risque est estimé en référence à certains paramètres caractéristiques de l'écoulement dont les plus usuels sont les tirants d'eau maximaux et les temps d'arrivée de l'onde.

5.3.1) Appréciation sommaire du débit.

Afin d'accéder rapidement à un ordre de grandeur du débit maximal à la rupture, on se place en hypothèse de rupture instantanée. Pour un barrage voûte, la rupture est supposée affecter la totalité de l'ouvrage. Pour un barrage en béton de type poids ou à contreforts, on considère généralement qu'elle n'intéresse qu'un seul plot.

Pour un barrage en remblai, on peut admettre une brèche verticale centrée sur le talweg, de largeur $L_0 = 3 Y_0$, Y_0 étant le tirant d'eau dans la retenue au moment de la rupture, au niveau du barrage et au droit du talweg. Dans la mesure où la sécurité publique est en jeu, et pour un calcul sommaire, il est recommandé de prendre en compte le tirant d'eau Y_0 correspondant au niveau des plus hautes eaux exceptionnelles, des cas d'espèce pouvant motiver l'adoption d'autres hypothèses.

L'ajustement d'une forme simple à la section prise en compte pour la rupture, permet d'obtenir l'estimation grossière Q du débit maximal au droit du barrage, selon le tableau ci-dessous :

Forme de la section	Caractéristiques géométriques	Débit au droit du barrage
Rectangle	L	$Q = 0,93. L. Y_0^{3/2}$
Triangle	m	$Q = 0,72. m. Y_0^{5/2}$
Trapèze	L, m	$Q = 0,93. L. Y_0^{3/2} + 0,72. m. Y_0^{5/2}$
Parabole	$l = k Y_0^{1/2}$	$Q = 0,54. k. Y_0^2$

avec :

L : largeur au plafond

m : fruit des berges

l : largeur au miroir

k : paramètre de forme

(unités : longueurs en m, débits en m^3/s).

Ainsi, par exemple, dans le cas d'un barrage en remblai de longueur en crête suffisante (supérieure à $3 Y_0$), le débit au droit du barrage est estimé par $Q = 2,8. Y_0^{5/2}$, pour tenir compte d'une rupture partielle (brèche rectangulaire de largeur $L = 3 Y_0$).

On pondère le débit ainsi trouvé par un coefficient de forme de la retenue, m , déterminé comme suit :

$m = 1,4$ pour une retenue très compacte ;

$m = 1$ pour une retenue normale ;

$m = 0,6$ pour une retenue très allongée.

Le débit maximal au droit du barrage est ainsi $Q = mQ$.

Le tirant d'eau maximal associé peut être estimé grossièrement par $Y_b = 0,5. Y_0$.

Une première estimation très grossière du risque aval peut être faite en étendant la valeur du débit ainsi trouvé aux premiers kilomètres de la vallée à l'aval de l'ouvrage (3 à 5 km selon la régularité de la vallée). Il ne faut pas, par contre, étendre de même la valeur du tirant d'eau. Celui-ci doit être recalculé, dans des sections choisies, par une formule de régime uniforme (voir 5.3.2). Cela nécessite de disposer des estimations du profil en travers et du coefficient de frottement de chacune de ces sections. A défaut, on pourra juger du débit calculé en se référant à la débitance de plein bord du lit mineur ou à d'autres variables hydrologiques éventuellement disponibles (débit centennal par exemple).

Dans tous les cas, une visite de terrain doit compléter l'examen des documents cartographiques disponibles. Elle permet de préciser les lieux a priori menacés, de déterminer les sections où une estimation des caractéristiques de l'onde serait nécessaire, éventuellement de préciser la description topographique de ces sections et d'estimer les coefficients de

frottement dans la vallée. On notera en particulier que le lit mineur peut avoir une importance marginale pour les grands barrages alors qu'il peut transiter une part importante du débit de rupture pour les faibles retenues.

5.3.2) Méthode simplifiée de routage de l'hydrogramme.

La méthode simplifiée citée au paragraphe 5.1. permet d'estimer les débits et tirants d'eau maximaux et les temps d'arrivée de l'onde en un certain nombre de sections choisies. La démarche est la suivante :

- estimation du débit maximal au barrage (comme indiqué au 5.3.1 ci- dessus) ;

- estimation du débit maximal en chaque section choisie, par un abaque donnant l'amortissement du débit maximal en fonction de la distance au barrage ;

- estimation du tirant d'eau maximal en chaque section choisie, à partir du débit maximal, par une formule de régime uniforme.

Les données nécessaires sont essentiellement les profils en travers des sections choisies, les pente et coefficient de frottement locaux de chaque section et les pente et coefficient de frottement moyens entre chaque section et le barrage.

5.3.3) Prise en compte d'ouvrages en travers.

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer quels sont les ouvrages en travers susceptibles de résister au passage du flot non perturbé par ces ouvrages.

Dans un deuxième temps, les surélévations à l'amont des ouvrages supposés résister sont calculées en régime permanent, en utilisant une loi d'ouvrage appropriée (loi de type seuil ou seuil avec orifices pour les remblais et les ponts,...). Ces calculs peuvent être conduits à l'aide d'un logiciel de calcul de ligne d'eau en régime permanent, en réexploitant la géométrie déjà utilisée en 5.3.2. A défaut, on peut faire une estimation plus grossière en ne calculant que la charge amont par la loi d'ouvrage et en interpolant par une ligne d'eau horizontale à l'amont de l'ouvrage.

5.4) Conclusion du calcul simplifié de rupture.

Les méthodes présentées permettent un diagnostic rapide, simple mais sommaire d'une situation de risque due à l'effacement éventuel d'un barrage. Elles permettent de déterminer notamment les zones pour lesquelles un complément d'information ou des calculs plus précis sont nécessaires. Dans la plupart des cas, elles permettent de dire si un barrage intéresse ou non la sécurité publique. Un utilisateur entraîné peut les appliquer à un petit barrage en moins d'une demi-journée, si les données nécessaires sont disponibles. Elles nécessitent cependant une certaine maîtrise de l'analyse de variables et de situations hydrauliques.

VI - CONCLUSION DU DIAGNOSTIC RAPIDE.

La conclusion du diagnostic rapide ne peut être faite qu'en considérant :

- les points communs à tous les types de barrages ;
- les points spécifiques, traités dans les chapitres B et C ci-après.

On se reportera donc aussi à l'un de ces chapitres.

En ce qui concerne le présent chapitre, le diagnostic rapide permettra d'indiquer si une étude hydrologique et une étude hydraulique de l'évacuateur sont nécessaires. Il pourra aussi conduire à quelques recommandations pour éviter le risque d'obstruction du déversoir par des corps flottants. Enfin, il permettra souvent de savoir si le barrage intéresse la sécurité publique.

**GUIDE POUR LE DIAGNOSTIC RAPIDE
D'UN BARRAGE EXISTANT**

A- TOUS BARRAGES

B- BARRAGES EN REMBLAI

par G. Degoutte et D. Lautrin

C - BARRAGES POIDS

B - BARRAGES EN REMBLAI

Ce chapitre concerne les barrages en terre ou en enrochements. Voir aussi dans le chapitre A les aspects à étudier qui sont communs à tous les types de barrages.

I - TYPE ; DESCRIPTION

1.1) Type

Les remblais étant des matériaux poreux, la distinction essentielle se fait selon la position et le type de l'étanchéité. On distingue essentiellement parmi les barrages anciens :

- les barrages en terre homogènes ;
- les barrages zonés, à noyau étanche et recharges en terre ou en enrochements ;
- les barrages en terre ou en enrochements, à masque en béton.

Certains barrages en terre construits au XIX^{ème} siècle ont vu leurs parements amonts confortés par des contreforts en maçonnerie. Enfin, il existe des barrages très anciens constitués d'un mur épais étanche en maçonnerie, épaulé à l'amont et à l'aval par des remblais.

1.2) Evacuateurs des crues

Un barrage en remblai ne peut pas admettre de submersion; la vérification du dimensionnement de l'évacuateur est donc absolument fondamentale (voir chapitre A paragraphe II).

II - RUPTURES DE BARRAGES EN REMBLAI

2.1) Mécanismes et causes de rupture

Les **mécanismes** de rupture des barrages en remblai sont :

- a) la destruction par surverse ;
- b) l'apparition d'un renard dans le remblai ou dans la fondation ou le long d'une conduite ;
- c) un glissement du talus aval ;
- d) un glissement du talus amont, généralement lors d'une vidange rapide.

Les **causes** de rupture pouvant provoquer l'un de ces mécanismes sont :

- pour a), l'insuffisance du déversoir de crue ou son obstruction par des éboulements ou bien des corps flottants ;
- pour b), un lent phénomène d'érosion interne, un colmatage progressif du drain, un contournement du drain, une fuite dans une conduite en charge, une dégradation de l'étanchéité du masque ;
- pour c et d), une évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux de recharge ou des pentes trop fortes ;
- pour c), l'apparition d'un suintement sur le talus aval du à un colmatage ou une saturation du drain ou bien à une dégradation du masque ; la présence d'arbres sur le talus aval ;
- pour d), une vidange plus rapide qu'habituellement ; la désorganisation de contreforts en maçonnerie par suite de gel-dégel ...

2.2) Pourquoi imaginer qu'un barrage ancien, longuement testé, risque de se rompre ?

Un barrage, même ancien, n'a certainement pas connu la crue la plus défavorable.

Par ailleurs, le vieillissement des matériaux peut entraîner un phénomène de renard ou bien des glissements de talus. Le vieillissement peut concerner les sols, les maçonneries d'éventuels contreforts, le béton d'un éventuel masque, la conduite.

Enfin, la saturation d'un remblai argileux peut mettre des dizaines d'années à se produire ; ainsi, nous avons connu le cas d'un barrage du Sud-Ouest de la France qui s'est rompu par renard 25 ans après sa mise en eau.

L'âge du barrage ne suffit donc pas à constituer une preuve de sa sécurité : il importe alors de se doter des moyens pour porter un diagnostic sur son état.

III - VISITE DU BARRAGE

3.1) Liste des points à noter.

La visite du barrage effectuée dans le cadre du diagnostic rapide a pour double rôle :

- de compléter ou confirmer les renseignements disponibles dans le dossier d'origine ;
- de se rendre compte de l'état de l'ouvrage.

Le tableau ci-après détaille l'ensemble des points à observer en complément de ceux déjà présentés dans le chapitre A, page 17.

Chaque point signalé fait ensuite l'objet d'un commentaire en 3.2 de manière à guider la visite en vue d'un diagnostic rapide.

3.2) Guide pour une visite de diagnostic rapide des barrages en remblai

Les numéros entre parenthèses correspondent à ceux du tableau synthétique, page 55.

(1) Parement amont

D'une manière générale il est beaucoup plus utile de visiter les barrages lorsqu'ils sont pleins pour bien observer les suintements et les venues d'eau. Il n'est alors possible de voir que la partie supérieure du parement amont. Dans le cadre d'un diagnostic rapide, il n'est utile de voir complètement le parement amont que s'il comporte des contreforts en maçonnerie, ou bien un masque et s'il y a des fuites, ou bien si l'on observe une tendance au glissement. Dans ces cas on procédera à une vidange la plus lente possible. Si les craintes sont sérieuses et si la vidange présente quelques difficultés, il sera plus raisonnable de la programmer dans le cadre d'un diagnostic complet.

(1.1) Masque en béton

On observera en particulier si les joints ou les éventuelles fissures sont ouverts. La connaissance du débit de fuite et de son évolution en fonction de la cote de l'eau permet de porter un jugement sur l'efficacité du masque.

Date visite.....

BARRAGE.....

Cote du plan d'eau par rapport au Niveau Normal des Eaux :

Points à observer	Présence ou absence	Renseignements à noter (état, position,nbre..)	Commentaires
<p>1. Parement amont</p> <p>1.1. masque béton 1.2. contreforts maçonnerie 1.3. amorces de glissements 1.4. végétation arbustive 1.5. protection antibatillage</p> <p>2. Parement aval</p> <p>2.1. suintements, fuites 2.2. végétation 2.3. amorces de glissements 2.4. débouchés des drains 2.5. autres</p> <p>3. Crête</p> <p>3.1. fissures amont aval 3.2. fissures rive à rive 3.3. tassements</p> <p>4. Drain</p> <p>5. Pied aval</p> <p>6. Dispositif d'auscultation.</p> <p>6.1. repères topographiques 6.2. piézomètres 6.3. drain 6.4 cellules de pression 6.5 autres</p> <p>7. Divers</p>			<p>fissuration, état des joints état des joints, altération des pierres bombements, fissures en crête dimension des arbres déformation,désorganisation des enrochements</p> <p>localisation, possibilité de mesure nature, position bombements, fissures en crête visibles ? obstrués ? terriers...</p> <p>position, largeur planéité de la crête...</p> <p>position, type (sur plans)</p> <p>état d'humidité, végétation</p> <p>stables ? état des tubes ; obstrués ?</p> <p>possibilité de mesure</p> <p>fiabilité du système de lecture tassomètres ...</p>

(1.2) Contreforts maçonnerie

On notera s'ils présentent des dégradations (déjointements, amorces de rupture).

(1.3) Amorces de glissement

Le signe le plus flagrant est généralement une fissure parallèle à la crête. Des bombements du parement amont ne sont pas toujours faciles à interpréter car ils peuvent être d'origine. En cas de doute, il est possible de recommander un contrôle topographique pour les retenues qui sont périodiquement abaissées.

(1.4) Végétation arbustive

Il convient de faire éliminer toute végétation arbustive car elle désorganise le remblai, les enrochements antibatillage, les maçonneries éventuelles ...

(1.5) Protection antibatillage

On notera si les enrochements de protection sont désorganisés et si cela risque de provoquer la dégradation du remblai sous-jacent. Dans le cas de petits barrages dépourvus d'enrochements, des marches se produisent au niveau du plan d'eau. Il importe de voir si elles sont stabilisées et si elles risquent de provoquer des glissements de la partie de talus située au dessus.

(2) Parement aval

Il est quasiment indispensable de faire l'observation du parement aval après une période non pluvieuse pour bien observer les suintements éventuels.

(2.1) Suintements, taches humides, fuites

Il convient d'être très vigilant car des suintements ou écoulements qui ne transitent pas par le drain peuvent être le signe avant-coureur d'un renard. Si des suintements légers sont visibles on recommandera de procéder au plus tôt à un piquetage et à un suivi régulier avec photos. Si un débit est mesurable, on recommandera de le mesurer en organisant la collecte. Il est préférable dans un tel cas de faire appel à un spécialiste des barrages. Si on observe une venue d'eau importante avec entraînement de grains de sol, on demandera une vidange immédiate et le recours à un spécialiste.

(2.2) Végétation

On recommandera l'enlèvement rapide de toute végétation arbustive sur le parement aval et sur le pied aval sur une bande de l'ordre de 5 m minimum. Le développement des systèmes racinaires risque en effet de colmater les drains ou de créer des passages préférentiels pour l'eau.

On notera aussi le type de végétation, certaines plantes étant le signe d'une humidité (joncs, prèles). Il sera intéressant de noter si la végétation se trouve sur un même plan horizontal, car cela signifierait qu'une couche du remblai aurait une perméabilité plus forte que le reste du remblai (voir (4) ci-après).

(2.3) Amorces de glissements - Voir (1.3)

(2.4) Débouchés des drains

Il est important de rechercher d'après les plans éventuels, la position des drains et de leurs débouchés. Si ces débouchés ne sont pas visibles, il faudra demander de les dégager. Si les débouchés sont obstrués, il est possible de constater une certaine humidité alentour.

(3) Crête

(3.1) Fissures amont aval

Si la crête est recouverte d'une chaussée goudronnée ou bétonnée, des fissures amont-aval traduisent un tassement de l'ouvrage. Ceci n'est pas forcément un signe inquiétant, sauf si le revêtement a été fait (ou refait) plusieurs années après la mise en eau.

(3.2) Fissures de rive à rive

Si des fissures de rive à rive sont observées peu après l'achèvement du barrage, elles peuvent être le signe d'un tassement différentiel (au niveau d'un changement de zonage, ou à l'aplomb d'un drain vertical). Ce phénomène se stabilise ensuite. Mais, si la crête présente des fissures parallèles à la crête, proches de l'un de ses bords et incurvées vers le parement correspondant, il s'agit très vraisemblablement d'un début de glissement de talus. Il faut alors demander qu'une surveillance rapprochée soit exercée ainsi que le recours à un spécialiste.

(4) Drain

Il est important de chercher à connaître le type de drain : vertical ou horizontal. En effet, une cause fréquente de l'humidité d'un parement aval est le contournement d'un drain horizontal, dû à une forte perméabilité horizontale du remblai. L'intérêt d'un drain vertical, s'il est poursuivi à une côte proche de celle du plan d'eau, est d'éviter ce type de problème. En France, les premiers drains verticaux ont été édifiés vers 1975 - 1980.

(5) Pied aval

Des humidités du pied aval du barrage peuvent être remarquées. Elles sont le signe d'une mauvaise étanchéité de la fondation et d'un mauvais drainage de la zone aval du barrage. Une telle circonstance ne s'accompagne pas toujours d'un risque pour l'ouvrage. Il convient de recommander la réalisation de puits de décompression et le suivi de leur piézométrie.

(6.1) Repères topographiques

On essaiera de vérifier la stabilité des repères topographiques. Sur un barrage en remblai ancien ne présentant pas de signes de mouvements particuliers, il n'est pas utile d'installer un système de contrôle topographique. En effet, les tassements sont normalement terminés et les mouvements sont comparables à l'erreur de mesure.

(6.2) Piézomètres

Malgré leur temps de réponse assez long, les piézomètres sont un renseignement précieux pour diagnostiquer un risque de contournement du drain ou de saturation du remblai à l'aval du drain. Ceci suppose que la base du piézomètre n'ait pas malencontreusement été placée à quelques décimètres d'un tapis drainant.

(6.3) Drain (dispositif de mesure)

Il convient de vérifier si le dispositif de mesure est en état et s'il est fiable. Par exemple, des remontées de plan d'eau aval peuvent compromettre les lectures. Il faut alors tenter de curer le ruisseau à l'aval du barrage.

En l'absence de tel dispositif il conviendra de demander une installation pour tous les barrages intéressant la sécurité publique et pour les barrages de hauteur supérieure à environ 7 m ou stockant plus de 100 000 m³ environ.

(6.4) Cellules de pression

Des cellules de pression interstitielle sont installées dans certains barrages en terre depuis environ 1970. Il convient de vérifier que la lecture faite est significative. Par exemple pour les cellules où la lecture est obtenue en appliquant une pression à l'aide d'une bouteille de gaz comprimé, on vérifiera périodiquement que les tuyaux ne sont pas obturés accidentellement au niveau du tableau de mesure.

IV - MESURES IMMEDIATES APRES VISITE DU BARRAGE

Lorsqu'elles s'imposent, les mesures suivantes sont à recommander rapidement sans attendre un éventuel diagnostic complet, et quelles que soient les conclusions du diagnostic rapide :

- enlèvement de la végétation ;
- dégagement des obstacles sur un déversoir de crue ;
- collecte des débits de fuite ;
- surveillance et piquetage d'une tache humide ;
- abaissement rapide de la retenue en cas de crainte d'apparition de renard.

V - STABILITE

La vérification de la stabilité au glissement des deux parements relève d'un diagnostic complet.

On donne cependant ci-dessous les fruits indicatifs qui assurent la stabilité des parements amont ou aval pour des matériaux habituels. Si les fruits des talus sont sensiblement inférieurs à ces valeurs, il conviendra de demander l'établissement d'un diagnostic complet surtout si la sécurité

publique est en jeu, ou si la visite de l'ouvrage a révélé des indices inquiétants (humidité du talus aval, signes d'instabilité...). Les fruits indicatifs proposés résultent d'une part des règles de l'art et d'autre part de notre expérience.

Hauteur du barrage	Type du barrage en terre	Fruit des talus	
		Amont	Aval
Inférieure à 5 m	- Homogène ou à zones	2	2
5 à 10 m	- Homogène, granularité étendue	2,5	2,25
	- Homogène, à fort pourcentage d'argile	2,75	2,25
	- A noyau et recharges grossières	2,25	2
10 à 15 m	- Homogène, granularité étendue	2,75	2,5
	- Homogène, à fort pourcentage d'argile	3	2,5
	- A noyau et recharges grossières	2,5	2,25

Pour ce qui concerne les barrages en enrochements, à noyau ou à masque, les fruits indicatifs sont de l'ordre de 1,5 à 2 selon la taille et la forme des blocs.

VI - CONCLUSION DU DIAGNOSTIC RAPIDE.

Cette approche rapide permet de porter l'un des jugements suivants :

- barrage sûr et suffisamment ausculté ;
- nécessité d'un entretien significatif ;
- nécessité de renforcer le dispositif d'auscultation ;
- nécessité d'établir un diagnostic complet ;
- danger très caractérisé.

Elle permet en outre de préciser quelles sont les études ou reconnaissances à développer plus particulièrement dans le cadre du diagnostic complet.

6.1) - 1er cas : barrage sûr et suffisamment ausculté.

Ce cas est assez rare, sauf si des travaux ont été réalisés depuis la construction du barrage. Il peut s'agir aussi de petits barrages (hauteur < 10 m) pour lesquels une auscultation très limitée peut suffire. La seule recommandation au maître d'ouvrage est dans ce cas de surveiller régulièrement l'ouvrage, de réaliser ou faire réaliser les mesures et de faire interpréter l'auscultation.

6.2) - 2ème cas : nécessité d'un entretien significatif.

Il s'agit de l'arrachage de la végétation. Selon le cas, les recommandations 6.3 ou 6.4 ci-après peuvent compléter ce jugement.

6.3) - 3ème cas : renforcement du dispositif d'auscultation.

N'est considéré ici que le cas où l'établissement d'un diagnostic complet n'est pas jugé nécessaire. Il s'agit donc de dispositifs d'auscultation simples et tout particulièrement on pourra recommander l'établissement de fossés ou caniveaux pour collecter les débits de fuite dans le corps d'ouvrage.

Si des dispositifs plus lourds tels que la mise en place de piézomètres sont à recommander, ils doivent être définis dans une première phase du diagnostic complet. Cette auscultation coûteuse sera ainsi bien adaptée au risque présenté par l'ouvrage et permettra en retour d'achever le diagnostic.

6.4) - 4ème cas : diagnostic complet de l'ouvrage.

Par diagnostic complet, nous entendons l'ensemble des travaux de reconnaissance et des études de l'ouvrage. Reconnaissance et auscultation doivent être pensés globalement : par exemple un sondage peut être équipé en piézomètre.

L'ensemble du diagnostic et la définition des reconnaissances et des dispositifs d'auscultation doivent être confiés à un même bureau d'étude.

La description plus complète des techniques de reconnaissance et de diagnostic complet fait actuellement l'objet d'une étude du CEMAGREF.

6.5) - 5ème cas : danger très caractérisé.

Un barrage en terre risque essentiellement de se rompre :

- soit de manière inopinée et brutale par phénomène de renard ;
- soit de manière brutale à l'occasion d'une très forte crue.

Si l'on redoute le phénomène de renard une surveillance très rapprochée des zones humides doit être exercée et, en cas d'écoulement significatif le plan d'eau sera rapidement abaissé.

Barrages en remblai



Conséquences de surverses sur des petits barrages en terre :

- dans le cas du haut, le parement aval a subi un glissement d'ensemble, la largeur en crête étant amputée d'environ 25% ;
- dans le cas du bas, le glissement du talus aval s'est poursuivi jusqu'à l'éventrement complet du barrage.





En cas de très forte crue, cette grille risque de provoquer une mise en charge de la tulipe à une côte très supérieure à celle qui est prévue.



L'absence de dissipateur d'énergie à l'aval de ce coursier bétonné provoque une grande fosse d'érosion. Celle-ci progresse vers l'amont, selon le mécanisme de l'érosion régressive ; elle risque à terme d'évoluer vers un contournement complet du barrage.



Ce barrage construit en 1978 a été victime en 1989 d'un début de renard dont le débouché se situe dans la première partie du talus, en extrémité droite (zone fléchée sur la photo du haut), puis d'un début de glissement de l'ensemble du pied du talus aval (photo du bas), alors même que la vidange complète était en cours. Ici, le diagnostic rapide a consisté simplement à constater un écoulement légèrement en charge au-dessus du drain tapis et à en conclure immédiatement à une mauvaise étanchéité du remblai, à un colmatage ou un contournement du drain et donc à la fois à un risque de renard et de glissement du talus aval. Haut de 17 m, ce barrage permet de stocker 2 Mm³.



Vue depuis l'aval de ce barrage haut de 8 m après rupture par renard. L'incident est survenu en pleine période sèche, l'ouvrage ayant environ 25 ans. La brèche a 15 m de large et 5,50 m de haut. Le volume stocké ne dépassait pas 40 000 m³.



Fuite par l'appui rive droite de ce barrage alpin de hauteur 7,5 m. L'appui est une moraine qui a été mal injectée. Les risques sont de voir cet incident évoluer en renard, ou bien entraîner un glissement du talus aval.

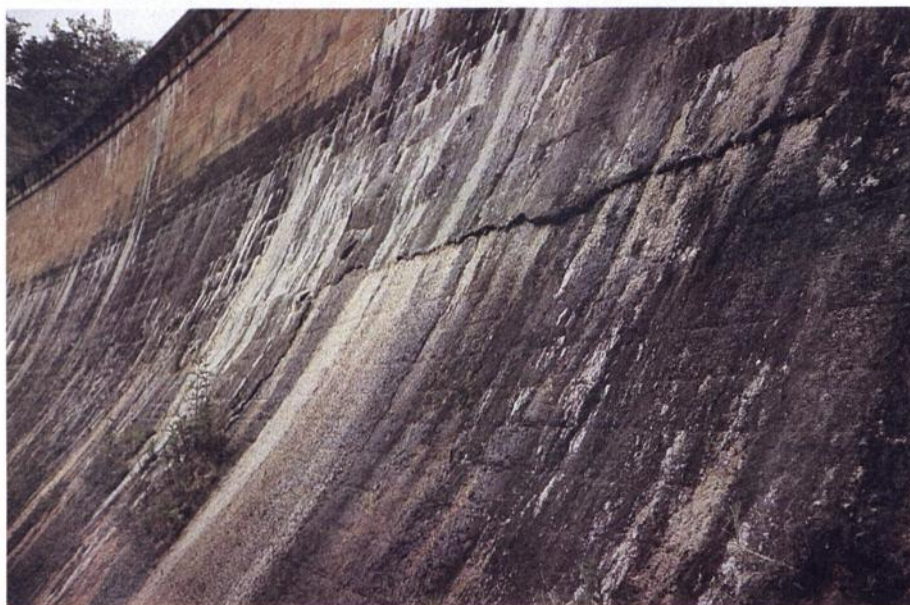


Glissement du talus amont d'un barrage en terre de 17 m de hauteur. Cet incident est survenu lors de la quatrième vidange de la retenue destinée à l'irrigation. On notera la progression du phénomène démarré à la base du talus et qui s'est stabilisé à l'aplomb du seuil déversant.

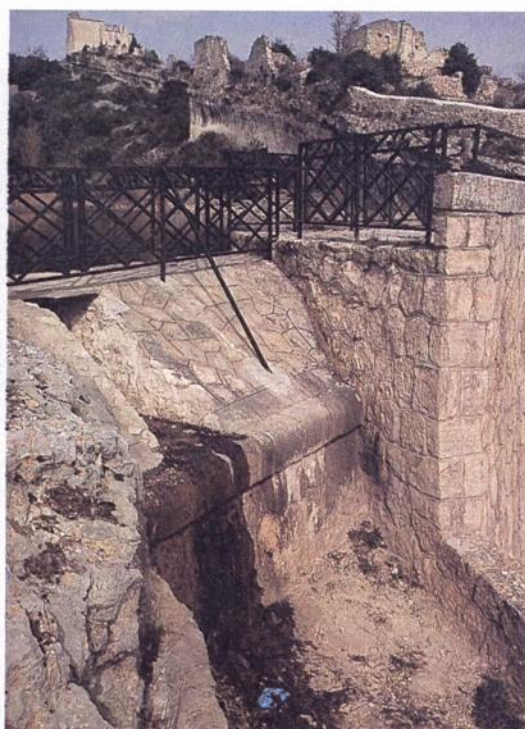
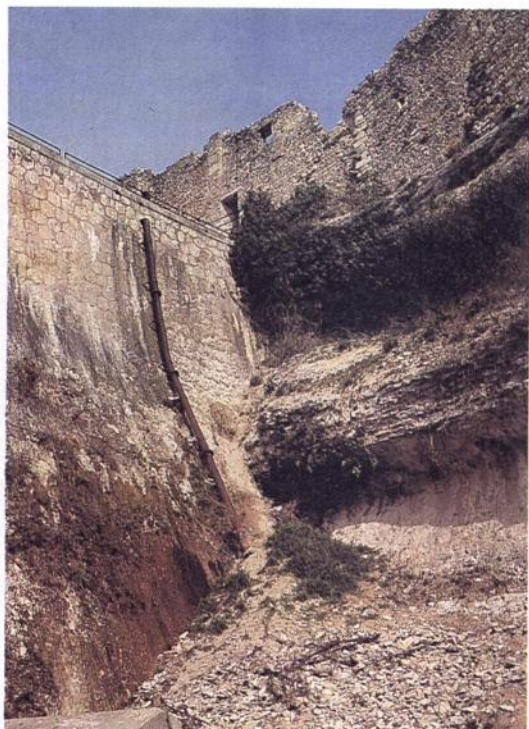
Barrages poids



Etat très dégradé du masque amont de ce barrage construit en 1870 et destiné à l'AEP. La capacité du déversoir de crue est insuffisante. La décision de le réhabiliter ou de le rendre transparent reste à prendre.



Ce barrage en maçonnerie achevé en 1906, haut de 14,5 m stocke 1 200 000 m³ pour l'alimentation en eau potable. Les traces de calcite sont le signe d'une importante circulation d'eau à travers la maçonnerie qui se dégrade lentement par perte de liant.

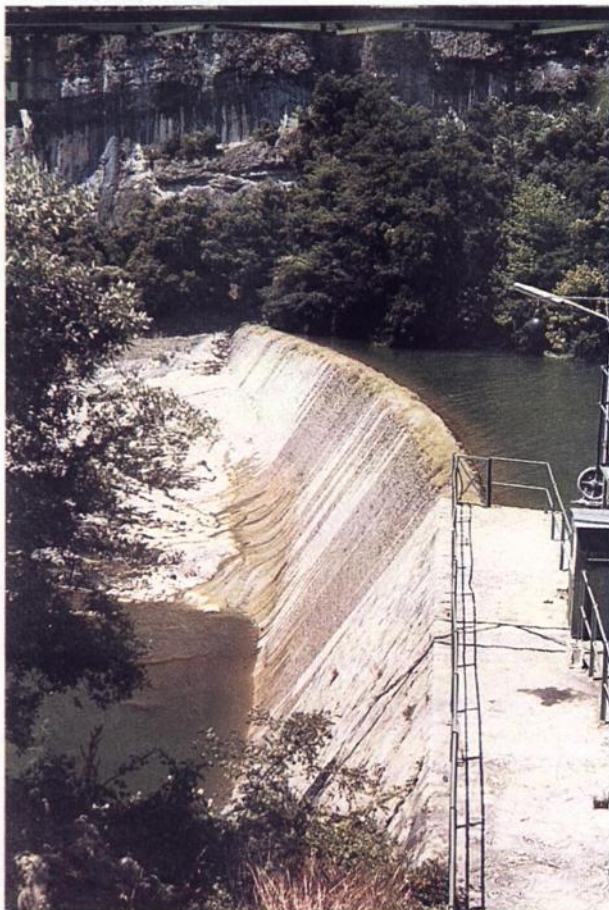


Barrage en maçonnerie construit à la fin du 19ème siècle, haut de 16,4 m, initialement destiné à l'AEP et maintenant simplement utilisé pour les loisirs. Un diagnostic rapide conclut à une stabilité insuffisante en cas de forte crue (le fruit est de 0,71). Le déversoir de crue a été réhaussé. L'échancrure réalisée ultérieurement n'améliore pas significativement sa capacité.



Ce barrage à vocation industrielle construit en 1909 (15,5 m ; 200 000 m³) n'a plus d'utilité. Assez délabré, il est dangereux et doit être rendu transparent.

Pour ce barrage déversant en maçonnerie haut de 13m, achevé en 1923, un diagnostic rapide a montré que la stabilité d'ensemble était insuffisante en cas de fort déversement. Le diagnostic complet réalisé après sondages carottés a proposé de conforter l'ouvrage en drainant sa fondation et en forant des barbacanes dans le parement aval, trop étanche en surface (barrage de Moulin Bertrand sur l'Hérault).



**GUIDE POUR LE DIAGNOSTIC RAPIDE
D'UN BARRAGE EXISTANT**

A- TOUS BARRAGES

B- BARRAGES EN REMBLAI

C - BARRAGES POIDS

par G. Degoutte

C - BARRAGES POIDS EN MAÇONNERIE OU EN BETON.

*Ce chapitre concerne l'ensemble des barrages **poids** qu'ils soient en maçonnerie ou en béton. Sont également traités les barrages **poids-voûte** plus ou moins arqués.*

Voir aussi dans le chapitre A les aspects à étudier qui sont communs à tous les types de barrages.

*
* * *

I - TYPE ; DESCRIPTION.

1.1) Type.

Les barrages poids ont d'abord été des murs en maçonnerie épais dimensionnés empiriquement (Fig.1a). Les premiers calculs de résistance des matériaux ont permis vers 1840 d'améliorer ce profil, en donnant aux barrages le profil triangulaire (Fig. 1b). Puis, les techniques de fabrication des liants et de mise en oeuvre des maçonneries ayant progressé, les efforts admissibles dans le corps d'ouvrage ont pu être accrus. Les profils ont alors été plus hardis, avec des fruits de l'ordre de 0,6 (Fig. 1c). Survint en 1895 la rupture du barrage vosgien de BOUZEY qui a amené Maurice LÉVY à mettre pour la première

fois en évidence le phénomène des sous-pressions. Les barrages étudiés depuis 1900 [9, 10] ont donc un fruit global plus fort, de l'ordre de 0,8 (Fig. 1d).

Il est remarquable de noter que plusieurs barrages du type 1c sont encore en service malgré leur conception nettement dépassée et leur risque potentiel.

Une évolution a également eu lieu en ce qui concerne les fondations. Ainsi le barrage espagnol Puentes, haut de 50 m, était fondé au centre sur des alluvions en graviers et sable : il fut emporté en 1802. Le barrage américain de Saint-François était fondé en partie sur des conglomérats à ciment argilo-gypseux compacts à l'état sec et qui se sont désagrégés par dissolution du gypse au contact de circulation d'eau dans une faille ; il s'est rompu en 1928. Depuis les années 1940-1950, avec le développement des techniques d'injection et les progrès rapides de la mécanique des roches, les barrages sont fondés sur du rocher de bonne qualité mécanique ou bien sur du rocher consolidé.

Ainsi, l'âge et le profil du barrage donnent des renseignements essentiels sur la qualité de sa conception.

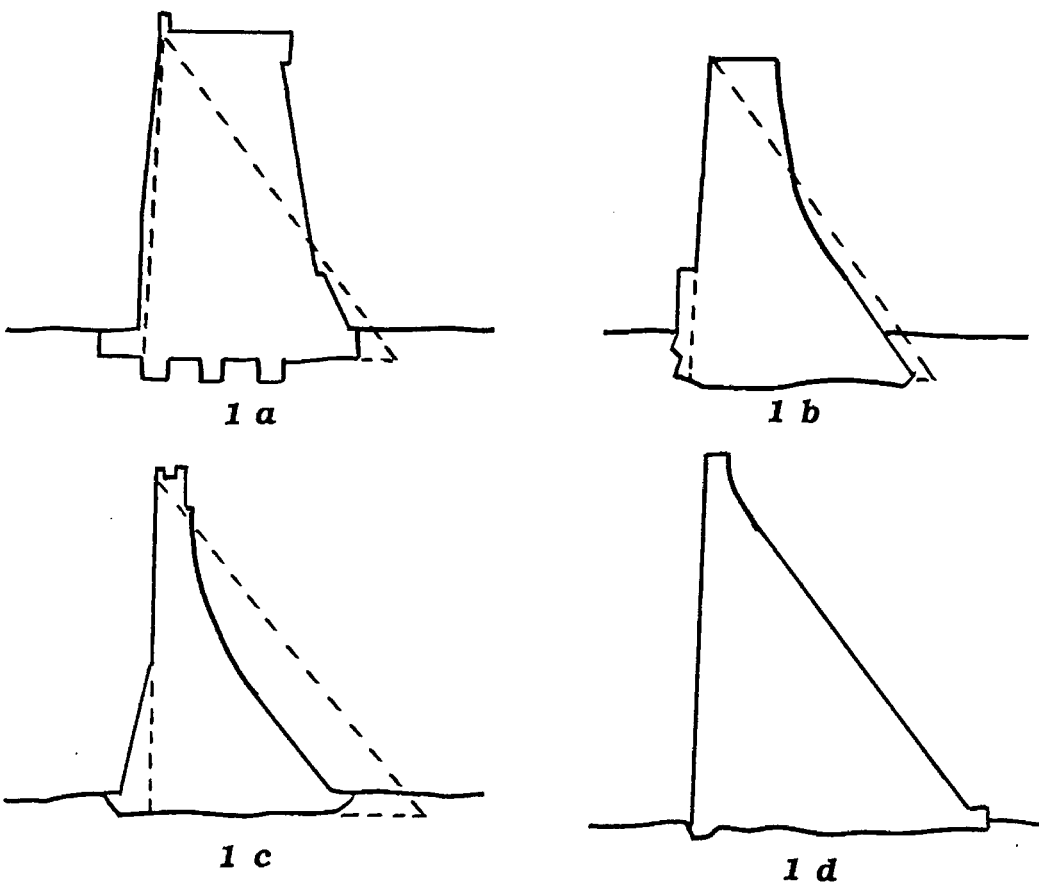


Figure 1 : évolution des profils des barrages poids.

1 a - barrage du Lampy (1782 - hauteur 22 m)

1 b - barrage de Chazilly (1837 - hauteur 22 m - fruit total 0,73)

1 c - barrage de Ternay (1867) - hauteur 41 m - fruit total 0,55)

1 d - barrage des Saints-Peyres (1936 - hauteur 61 m - fruit total 0,80)

En pointillé, figure le profil théorique avec un fruit total de 0,8.

1.2) Surélévation et modifications.

Il n'est pas rare que des barrages poids aient été surélevés dans le courant du XIX^{ème} ou au début du XX^{ème} siècle. A défaut de renseignement dans les archives, cette modification peut souvent être facilement décelée en observant les changements de profil, de nature de matériau ou de technique de rejointoiement. Cette circonstance est généralement inquiétante, car ces surélévations ont rarement été accompagnées d'une vérification de stabilité.

Certains barrages ont été ultérieurement renforcés par des tirants d'ancrage ou par des remblais aval. Cela ne suffit pas forcément à garantir leur sûreté.

1.3) Evacuation des crues.

Ces ouvrages sont souvent déversants, quelquefois sur toute leur longueur. Dans les autres cas ils sont dotés d'un évacuateur latéral ou central. Dans quelques cas enfin, des galeries sont censées évacuer une partie du débit de crue, mais ne sont plus forcément opérationnelles.

La stabilité d'un barrage poids de faible hauteur, déversant ou non, est très fortement dépendante du niveau atteint par la retenue lors d'une crue. Ces ouvrages ont donc rarement été éprouvés dans le cas de charge le plus défavorable, et souvent de loin. Cette constatation est spécifique de ce type de barrage puisque la stabilité d'un barrage en remblai ou d'une voûte est assez peu affectée par le niveau maximal des eaux.

1.4) Archives.

Contrairement aux barrages en terre, les barrages en maçonnerie ont toujours été conçus comme des ouvrages d'art. Aussi, un dossier précis en a souvent été établi avec profils, coupes, métrés, épures de stabilité.

Il ne faut pas désespérer a priori de retrouver ces renseignements. Ainsi pour un barrage construit en 1870 par une société privée, nous avons pu retrouver le dossier de la construction aux archives départementales et le dossier de projet aux archives nationales.

Les documents établis avant 1940 environ sont presque toujours extrêmement minutieux et précis. Ceci ne doit cependant pas donner l'impression que l'ouvrage a été bien calculé ou qu'il a été réalisé conformément aux prescriptions.

Néanmoins, ces archives sont toujours précieuses, car elles renseignent sur la fondation, sur la nature des matériaux et leur mode de mise en oeuvre, sur les incidents de chantier...

II - RUPTURES DE BARRAGES POIDS.

2.1) Mécanismes et causes de rupture.

Les **mécanismes** de rupture des barrages poids sont de façon schématique :

- le glissement du barrage sur sa fondation ;
- le renversement du barrage ou d'un plot de barrage par rapport au pied aval ;
- les mêmes mécanismes pour la partie supérieure du barrage.

Les calculs rapides, présentés de 5.3.1 à 5.3.3, reprennent ces schémas de rupture.

Les **causes** pouvant amener à l'un de ces schémas sont :

- la surélévation du plan d'eau (crue) qui augmente à la fois la poussée de l'eau et les sous pressions ;
- une augmentation des sous pressions, soit par colmatage du drainage de la fondation, soit par accroissement des circulations d'eau ;
- un séisme dont les conséquences sont grossièrement d'ajouter une composante horizontale au poids de l'ouvrage et de diminuer sa résistance mécanique en le fissurant ;
- une progressive dissolution du liant qui a pour conséquences de diminuer le poids de l'ouvrage et d'accroître les sous pressions dans le corps du barrage.

2.2) Pourquoi imaginer qu'un barrage poids ancien, longuement testé, risque de se rompre ?

Les déformations répétées du barrage sous l'effet des variations thermiques et des fluctuations du plan d'eau provoquent un phénomène de fatigue du matériau et donc une perte progressive de résistance mécanique de la maçonnerie. En outre, le liant peut être lentement lessivé sous l'effet de la percolation de l'eau dans le corps de l'ouvrage, entraînant ainsi à la fois une augmentation des sous-pressions internes, une baisse de la densité et une moindre résistance mécanique. Enfin, cette dissolution provoque des concrétions de calcite sur le parement aval qui peuvent entraîner son étanchement et une augmentation préjudiciable des sous pressions. Par exemple, la maçonnerie du barrage de Bosméléac construit en 1839 contenait en 1984 :

- 10 % de chaux dans sa partie supérieure n'ayant jamais été affectée par des infiltrations ;
- 6,9 % dans une zone anciennement affectée par des infiltrations ;
- 5,8 % dans une zone de suintement.

Ces divers mécanismes dégradent lentement mais progressivement les conditions de sûreté de l'ouvrage.

De plus, les efforts subis par l'ouvrage dépendent grandement de la hauteur d'eau déversante, et donc du débit de la crue. Par exemple, le calcul de stabilité d'un ouvrage construit en 1877 a montré que celui-ci était stable jusqu'à un débit de l'ordre de $450 \text{ m}^3/\text{s}$. La plus grosse crue connue en un peu plus de 100 ans était de $420 \text{ m}^3/\text{s}$, mais la crue millénaire estimée par des méthodes modernes est de $850 \text{ m}^3/\text{s}$ [11].

L'âge des barrages ne suffit donc pas à constituer une preuve de leur sécurité : il importe alors de se doter des moyens pour porter un diagnostic sur leur état.

III - VISITE DU BARRAGE.

3.1) Liste des points à noter.

La visite du barrage effectuée dans le cadre du diagnostic rapide a pour double rôle :

- de compléter ou confirmer les renseignements disponibles dans le dossier d'origine ;
- de se rendre compte de l'état de l'ouvrage.

Le tableau ci-après détaille l'ensemble des points à observer en complément de ceux déjà présentés dans le chapitre A.

BARRAGE.....

Cote du plan d'eau par rapport au NNE..... Temps.....

Points à observer	Présence ou absence	Renseignements à noter (état, position,nbre..)	Commentaires
<p>1. Parement amont</p> <p>1.1. masque béton 1.2. enduit bitumineux 1.3. pierres apparentes 1.4. fissures 1.5. masque type Maurice LEVY</p> <p>2. Parement aval</p> <p>2.1. suintements 2.2. fuites 2.3. fuites sous pression 2.4. calcite 2.5. fissures 2.6. végétation 2.7. état de surface 2.8. remblai aval</p> <p>3. Crête</p> <p>3.1. fissures amont aval 3.2. fissures rive à rive 3.3. tirants d'ancrage</p> <p>4. Galeries.</p> <p>4.1. suintements, concrétions 4.2. état du rocher en fondation 4.3. état du corps du barrage</p> <p>5. Drains</p> <p>5.1. du corps de barrage 5.2. de la fondation</p> <p>6. Dispositif d'auscultation.</p> <p>6.1. débit de fuite dans l'ouvrage 6.2. fissuromètres, vinchons stable 6.3. autres</p> <p>7. Divers</p>			<p>.fissuration, accrochage... .tenue dans le temps .état des joints ;suintements .ouvertes, fermées</p> <p>.surface concernée et localisation .risque d'étanchement</p> <p>.ouvertes, fermées .dislocation . sain, friable... .hauteur ; drainant ?</p> <p>.ouvertes, fermées .ouvertes, fermées .auscultables ?</p> <p>.friable, sain... .friable, sain...</p> <p>.position, colmatage .possibilité de mesure</p> <p>.possibilité de collecter .oxydation ; scellement</p> <p>.piézomètres...</p>

Chaque point signalé fait ensuite l'objet d'un commentaire en 3.2 de manière à guider la visite en vue d'un diagnostic rapide.

3.2) Guide pour une visite de diagnostic rapide des barrages poids.

Les numéros entre parenthèses correspondent à ceux du tableau synthétique de la page 82.

3.2.1) Aspects spécifiques aux barrages poids.

(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 de baisser le plan d'eau pour observer le parement amont. Si cette opération présente quelques difficultés, il est raisonnable de la programmer dans le cadre du diagnostic complet puisqu'il sera forcément nécessaire dans ce cas.

(1.1) Masque béton.

Le masque en béton peut être d'origine ou peut avoir été ajouté après coup. On observera 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 du masque.

(1.2) Enduit bitumineux.

Il était courant vers les années 1920-1940 de revêtir les parements amonts d'un enduit bitumineux. L'expérience montre que ceux-ci sont très dégradés dans les zones périodiquement hors d'eau (cloquages, décollements, fissures...).

(1.3) Pierres apparentes.

Une observation détaillée des joints permet de bien 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.

(1.4) Fissures.

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

Sur le plan hydraulique, on cherchera 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 risque de lessivage du liant.

(1.5) Masque Maurice LEVY.

On peut rencontrer ce type de masque sur les barrages poids datant du début du XXème siècle (1900 à 1940). Le masque amont mince en maçonnerie prend appui sur le corps de l'ouvrage au moyen de voûtes délimitant des puits verticaux de drainage. Les débits de fuite à travers le

masque sont collectés en pied des puits et évacués par une conduite sous le corps du barrage. Les barrages de ce type ne sont donc pas susceptibles d'être le siège de sous-pressions internes.

(2) Parement aval.

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

(2.1 à 2.4) 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 calcite 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.

(2.2) Fuites.

Si les fuites sont mesurables, on cherchera 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.

(2.3) Fuites sous pression.

Des fuites sous pression se produisent lorsque le parement aval a été trop bien jointoyé. Après diagnostic complet, un réseau de barbacanes sera sans doute à recommander.

(2.5) Fissures.

Sur ce type d'ouvrage, les fissures sont souvent inactives. L'observation des dépôts de calcite permet de s'en assurer. A défaut, on préconisera des témoins en plâtre à remplacer par des dispositifs de mesure d'écartement s'ils se brisent.

(2.6) Végétation.

Si une végétation arbustive s'est développée sur le parement, il faut l'éliminer au plus tôt, car elle disloque la maçonnerie. Selon la gravité il faudra envisager un tronçonnage avec stérilisation ou bien un dessouchage avec reprise des cavités. Le pied aval doit également être dégagé sur quelques mètres pour les mêmes raisons et pour faciliter l'observation.

(3.1) Fissures amont-aval.

On cherchera 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 (1.4).

(3.2) Fissures rive à rive.

Elles sont peu courantes. On peut rencontrer ce phénomène pour des barrages en forme de mur épais lorsque le matériau du corps du barrage a des caractéristiques médiocres. Une auscultation est également nécessaire.

(3.3) Tirants d'ancrage.

Certains barrages ont été confortés par tirants d'ancrage à partir de l'année 1935. Les tirants mis en oeuvre avant 1970 environ posent 2 types de problèmes :

- ils ne sont pas auscultables ;
- leur protection contre le risque de corrosion est insuffisante. On a quelquefois été amené à considérer que des tirants d'ancrage anciens étaient devenus inopérants.

Dans ce cas et si malgré tout, le barrage a un comportement apparemment normal, il est conseillé d'installer un pendule inversé pour mesurer finement les déformations amont-aval du barrage. En cas de dérive, un relâchement des tirants pourra être soupçonné.

Le pendule peut être installé en plaçant le fil au centre d'un forage descendu jusque dans la fondation ou bien dans un tube scellé à un parement vertical. La cabine de lecture se trouve en crête du barrage. C'est le seul cas où la mise en place de ce type d'instrument peut être recommandée dès l'établissement du diagnostic rapide.

(4) Galeries.

Les barrages poids de faible hauteur disposent rarement d'une galerie. S'il en existe une, c'est un bon moyen d'observation de la qualité mécanique du matériau constituant le barrage ou du rocher de fondation ainsi que de l'étanchéité de l'ouvrage. Les galeries sont souvent équipées d'un réseau de drainage de la fondation et/ou du corps de barrage. Il importe de vérifier leur état (colmatage) et de voir s'ils permettent une mesure de débit ou de pression (voir (5)).

(5) Drains.

Les petits barrages ne sont généralement pas drainés et n'ont d'ailleurs pas forcément besoin de l'être, ce qui devra être vérifié par un calcul de stabilité (voir chapitre V ci-après). Si des drains ont été réalisés, il est vraisemblable qu'ils ont une utilité. Il importe absolument de vérifier qu'ils ne sont pas colmatés. Pour cela l'examen des graphiques d'évolution pluriannuels est précieux.

Les drains du barrage peuvent être des forages verticaux raccordés à une galerie périmétrale ou bien des forages horizontaux débouchant sur le parement aval.

Les drains de fondation peuvent être réalisés depuis une galerie de pied ou bien depuis le pied aval.

(6) Auscultation.

Sauf exception les petits barrages en maçonnerie anciens n'ont pas de dispositif d'auscultation d'origine.

Un minimum d'auscultation est à recommander, selon la taille de l'ouvrage :

- mesure du débit de fuite si le niveau du plan d'eau aval le permet ;
- mesure des drains éventuels (en débit ou en pression) ;
- mesure d'écartements de joints ou fissures actifs.

Des dispositifs tels que piézomètres nouveaux, pendules... sont à réserver à des barrages d'une certaine importance ou à des barrages posant problème : c'est à l'occasion du diagnostic complet qu'il faudra les envisager.

Pour ce qui concerne le suivi topographique, il n'est pas utile

d'équiper les petits barrages poids. Les déplacements sont en effet comparables à la précision de mesure. En cas de crainte, des pendules sont plus appropriés.

3.2.2) Aspects communs à tous les types de barrage.

On se réfère à la numérotation du tableau joint au chapitre A. Il ne s'agit ici que d'affiner les commentaires déjà effectués dans ce chapitre pour ce qui concerne les barrages poids.

(1.4) Déversoir de crue.

L'obstruction d'un déversoir de crue par des corps flottants ou sa saturation peut sembler moins grave que pour un barrage en remblai. En effet, un déversement par-dessus la crête d'un ouvrage en béton ou en maçonnerie est mécaniquement admissible. Il suffit de s'assurer que l'on ne risque pas de dégrader la résistance des fondations. Par contre, la stabilité des petits barrages poids est très sensible à une surélévation du plan d'eau. Il convient donc de dégager tous les obstacles (piquets, supports de passerelle...) et de modifier des systèmes de capacité limitée. Il en va ainsi par exemple des seuils déversants suivis de passages trop étroits au travers du corps de barrage.

Si ces travaux présentent quelques difficultés, il convient de vérifier la stabilité du barrage pour le niveau des plus hautes eaux calculé en tenant compte des obstacles.

IV - MESURES IMMEDIATES APRES VISITE DU BARRAGE.

Les mesures suivantes sont à recommander rapidement, sans attendre un éventuel diagnostic complet de sécurité du barrage et quelles que soient les conclusions du diagnostic rapide :

- enlèvement de la végétation ;
- enlèvement de la calcite ;
- dégagement des obstacles sur un déversoir ;
- collecte des débits de fuite, si la topographie des lieux le permet aisément et si les fuites sont mesurables.

V - CALCULS DE STABILITE.

5.1) Approche rapide.

Un barrage de type poids à profil triangulaire est stable si le total des fruits des 2 parements est de l'ordre de 0,9. Pour un profil différent, on considère pour le parement aval le fruit moyen tel que défini sur les schémas ci-dessous :

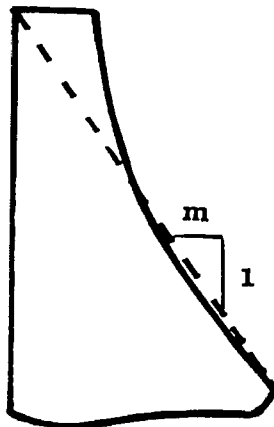


Figure 2 : fruit moyen d'un barrage poids pour une approche rapide.

Cette simple approche conduira à être inquiet si le fruit est inférieur à 0,6 ou 0,7.

Bien sûr, plusieurs caractéristiques doivent être chiffrées pour affiner ce jugement rapide. Trois ont en particulier un rôle très important :

- la densité du matériau du corps du barrage ;
- la cote des plus hautes eaux ;
- les sous-pressions.

Le principe du calcul de stabilité classique des ouvrages de type poids est extrêmement simple. Il peut donc être intéressant de le faire au stade du diagnostic rapide pour tester la sensibilité à diverses inconnues.

5.2) Données et hypothèses.

. **La densité** peut varier de 2,2 pour une maçonnerie poreuse à 2,5 pour un béton en bon état. Il est prudent d'adopter une valeur ne dépassant pas 2,3 pour un barrage en maçonnerie [11].

. **Niveau amont** : il faut envisager différents niveaux amont, le cas de charge le plus défavorable étant très généralement celui des plus hautes eaux. La crue de période de retour 1000 ans est généralement retenue pour les barrages de hauteur modeste.

. **Le niveau aval** a une influence tout particulièrement sur la sous-pression ; c'est le niveau de la ligne d'eau pour le débit considéré.

. **Sous-pression** : le diagramme classique en cas de fondation non drainée et homogène consiste à adopter une sous pression égale à la charge d'eau aux deux extrémités du barrage et une variation linéaire entre les deux. Ce diagramme peut être

optimiste dans le cas d'une roche fissurée. Si la fondation du barrage est drainée, ce qui devrait être le cas, et si les drains ne sont pas colmatés, la mesure de la piézométrie permet facilement de préciser le diagramme des sous-pressions.

. **Séisme** : on n'effectuera pas de calcul au séisme à ce stade. En effet, le calcul au séisme pour le niveau de retenue normal ne conduit pas généralement à des résultats plus défavorables que le calcul en crue sans séisme.

. **Coefficient de frottement vis à vis des fondations** : les ouvrages sont généralement fondés sur un rocher résistant. Le coefficient de frottement $\text{tg}\phi$ entre béton (ou maçonnerie) et rocher peut être valablement pris égal à 0,75. Toutefois pour des fondations sur des marnes le coefficient est plus proche de 0,5 seulement (quelques cas en Bourgogne). De même des roches stratifiées peuvent avoir un coefficient de frottement très défavorable selon l'orientation, le plan de schistosité (cas de schistes fracturés, de grès stratifiés...).

5.3) Principes du calcul.

La méthode classique consiste à faire un calcul de résistance des matériaux en élasticité linéaire [4]. Le calcul des forces en présence et de leurs moments permet de déterminer :

- la résultante des forces verticales V , en tenant compte des sous pressions ;
- la résultante des forces horizontales H ;
- le moment résultant M par rapport au milieu de la base ;
- l'excentricité $e = M/V$ de la résultante.

Soit en outre $\text{tg}\phi$ le coefficient de frottement entre matériau du barrage et fondation.

5.3.1) - Stabilité d'ensemble.

La stabilité d'ensemble est assurée si les deux conditions suivantes sont simultanément vérifiées.

a) Sécurité au glissement.

Le coefficient de sécurité au glissement, $F = Vtg\phi/H$, doit être supérieur à 1, si les différents paramètres ont été estimés sans optimisme et pour le cas de charge le plus défavorable.

b) Règle du tiers central.

La règle du tiers central consiste à vérifier que la contrainte au coin amont (soit $V/L - 6 M/L^2$) est une compression, c'est-à-dire que l'excentricité $e = M/V$ est inférieure à $L/6$. Des tractions modérées sont cependant admissibles au pied amont.

5.3.2) - stabilité interne.

On considère maintenant une portion de barrage délimitée entre la crête et un plan horizontal. On effectue le même calcul de contrainte au coin amont du barrage dans ce plan, sans tenir compte des sous-pressions (calcul en contraintes totales). La stabilité interne est jugée satisfaisante lorsque cette contrainte est au moins égale à 0,75 fois la hauteur d'eau en ce point (règle de Maurice LEVY satisfaite à 75 %).

Ce calcul est à mener en prenant tour à tour plusieurs plans intermédiaires entre la fondation et la crête du barrage.

5.4) - Conclusions du calcul de stabilité.

Il est important de tester la sensibilité aux inconnues, dans des fourchettes raisonnables. Ces inconnues sont la densité, les niveaux amont et aval, les sous-pressions.

On sera prudent pour les densités : l'intérieur du corps de barrage peut être plus médiocre que ne le laisse supposer l'état des parements.

Le calcul d'un barrage arqué (barrage poids voûte) dont la tenue ne s'avèrerait pas assurée par le seul poids relève du diagnostic complet. Le calcul a souvent montré que la contribution de l'effet voûte s'avèrait en pratique peu significative.

Ce premier calcul permet de conclure à la stabilité ou à l'instabilité si les résultats sont très nets. Il permet aussi de montrer quelles sont les données dont il convient d'améliorer la connaissance dans le cadre du diagnostic complet.

VI - CONCLUSION DU DIAGNOSTIC RAPIDE.

Cette approche rapide permet de porter l'un des jugements suivants :

- barrage sûr et suffisamment ausculté ;
- nécessité d'un entretien significatif ;
- nécessité de renforcer le dispositif d'auscultation ;
- nécessité d'établir un diagnostic complet ;
- danger très caractérisé.

Elle permet en outre de préciser quelles sont les études ou reconnaissances à développer plus particulièrement dans le cadre du diagnostic complet.

6.1) - 1er cas : barrage sûr et suffisamment ausculté.

Ce cas est assez rare, sauf si des travaux ont été réalisés depuis la construction du barrage. Il peut s'agir aussi de petits barrages (hauteur < 10 m) pour lesquels une auscultation très limitée peut suffire. La seule recommandation au maître d'ouvrage est dans ce cas de surveiller régulièrement l'ouvrage et d'interpréter l'auscultation.

6.2) - 2ème cas : nécessité d'un entretien significatif.

Il s'agit de l'arrachage de la végétation, du rejointoiement de pierres descellées, de l'enlèvement de la calcite et surtout du décolmatage des drains. Selon le cas, les recommandations 6.3 ou 6.4 ci-après peuvent compléter ce jugement.

6.3) - 3ème cas : renforcement du dispositif d'auscultation.

N'est considéré ici que le cas où l'établissement d'un diagnostic complet n'est pas jugé nécessaire. Il s'agit donc de dispositifs d'auscultation simples :

- fossés ou caniveaux pour collecter les débits de fuite dans le corps d'ouvrage ;
- équipement de drains en piézomètres ;
- fissuromètres.

Si des dispositifs plus lourds tels que pendules ou forage de piézomètres sont à recommander, ils doivent être définis dans une première phase du diagnostic complet. Cette auscultation coûteuse sera ainsi bien adaptée au risque présenté par l'ouvrage et permettra en retour d'achever le diagnostic.

Une exception toutefois pour le cas des barrages confortés par des tirants d'ancrage et dont le seul problème est le risque de corrosion des tirants : on peut alors recommander l'installation de pendules, sans diagnostic complet.

6.4) - 4ème cas : diagnostic complet de l'ouvrage.

Par diagnostic complet, nous entendons l'ensemble des travaux de reconnaissance et des études de l'ouvrage. Reconnaissance et auscultation doivent être pensés globalement : par exemple un forage peut être équipé en piézomètre au lieu d'être rebouché, ou bien on peut profiter de l'installation d'un pendule pour réaliser un forage.

L'ensemble du diagnostic et la définition des reconnaissances et des dispositifs d'auscultation doivent être confiés à un même bureau d'étude.

La technique de reconnaissance classique est le sondage carotté réalisé depuis la crête et descendu jusque dans la fondation. La pose d'une sondeuse sur la crête d'un barrage peut parfois paraître acrobatique mais est relativement aisée. Une plate-forme déplacée au tire-fort peut s'avérer nécessaire si la crête est arrondie. Cette reconnaissance lourde doit être valorisée au mieux par des reconnaissances légères [10]:

- essais d'eau de type Lugeon ;
- mise en place de cellules de pression interstitielle ;
- méthodes géophysiques ;
- méthodes diagraphiques ;
- essais en laboratoire sur échantillons prélevés.

Les techniques diagraphiques ou la géophysique permettent de vérifier, à moindre frais, la représentativité des sondages [12]. Elles apportent en outre des renseignements complémentaires non ponctuels sur les paramètres essentiels :

densité, porosité, fissuration. Des essais tels que pressiomètre ou dilatomètre permettent d'estimer les caractéristiques mécaniques dont le module d'élasticité des matériaux. Ces renseignements sont nécessaires si l'on a prévu un calcul aux éléments finis, ce qui s'avère utile en cas de courbure marquée ou si l'étroitesse de la vallée autorise un bon report de charge sur les appuis.

Ces reconnaissances donnent donc les renseignements nécessaires à un calcul de stabilité tel qu'on l'a déjà décrit, suivi éventuellement d'un calcul aux éléments finis à 3 dimensions. Elles donnent en outre des renseignements sur la qualité du matériau constitutif du barrage et sur la nécessité de le traiter pour l'étancher ou le renforcer.

La description plus complète des techniques de reconnaissance et de diagnostic complet fait actuellement l'objet d'une étude du CEMAGREF.

6.5) - 5ème cas : danger très caractérisé.

Contrairement au barrage en terre, un risque de rupture brutale et inopinée n'est pas à redouter en dehors des périodes de crue. Des risques avant-coureurs tels que des fissures ou des suintements nouveaux apparaissent d'abord. Cependant, en cas de forte crue, le risque de rupture brutale et inopinée existe. Aussi, si le barrage est en très mauvais état (fuites importantes), si sa stabilité paraît nettement insuffisante, on recommandera de baisser la retenue sans attendre l'établissement d'un diagnostic complet. Mais cet abaissement doit être étudié en fonction du volume de la tranche de stockage ainsi constituée et du risque de crue. Le niveau nouveau de la retenue "normale" doit être tel que le niveau nouveau des plus hautes eaux améliore notablement la stabilité de l'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CIGB, 1983 - Détérioration de barrages et réservoirs : recueil et cas d'analyse, Paris, Décembre 1983.
- [2] ROYET P. et al., 1990 - Sécurité des barrages. Enquête dans 18 départements. Ministère de l'Environnement, CEMAGREF, 28 pages.
- [3] DUBAND D. et al., 1988 - Evaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du Gradex. XVIème congrès des grands barrages (SAN FRANCISCO, USA), Q63 - R60, 1008 - 1047.
- [4] Ministère de l'Agriculture, 1977 - Technique des barrages en aménagement rural, Paris, Septembre 1977, réédité 1989, 325 p.
- [5] GINOCCHIO R., 1978 - L'énergie hydraulique. Eyrolles éditeur, 598 p.
- [6] ROLAND Y., 1989 - Réalisation et sécurité des barrages en terre de moins de 20 m dans le Sud-Ouest, Mémoire de 3ème année - ENITRTS, CEMAGREF Bordeaux, 104 p. + annexes.
- [7] CTGREF, 1978 - Appréciation globale des difficultés et des risques entraînés par la construction des barrages, 27 p.
- [8] PERRAUD M. F., 1991 - Etude de performance d'un modèle simplifié de calcul de propagation d'onde de rupture de barrage. DEA - Université Claude BERNARD Lyon I., CEMAGREF Lyon, 62 p.

- [9] LINO M. et al - Vieillissement de quelques barrages français très anciens et pratique de leur réhabilitation. XVIIème congrès des grands barrages (VIENNE, AUTRICHE), Q65-R1, 1-21.
- [10] DEGOUTTE G., 1990 - La santé des barrages anciens. Revue Courants n° 1, 58-61.
- [11] DEGOUTTE G., 1986 - Sécurité des barrages anciens : renforcement d'un barrage par des tirants actifs. Informations techniques du CEMAGREF, 62 (3), 6 p.
- [12] MONFORT L. et al., 1991 - Eléments de méthodologie pour la détection et l'analyse du vieillissement illustrée par des exemples. XVIIème congrès des grands barrages (VIENNE, AUTRICHE) Q65 - R23, 405-437.

Photo de couverture (CEMAGREF).

Barrage de Chartrain, destiné à l'alimentation en eau potable de Roanne (hauteur 47 m, volume 3 600 000 m³). L'ouvrage construit en 1892 doit être conforté.

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 92.53.17.00
Dépot légal : 132 — Février 1993
Imprimé en France



Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens - 1992, 1^{re} édition, ISBN 2-85362-302-5. ISSN 1158-9965. Dépôt légal 4^e trimestre 1992 - "Etudes" du CEMAGREF, série Hydraulique Agricole n°13 - Série dirigée par B. Lesaffre, chef de département - Numéro préparé par G. Degoutte avec la collaboration de B. Chastan et D. Lautrin - Photo de couverture : CEMAGREF - Impression et façonnage : imprimerie Louis Jean, BP 87, 05003 Gap - Edition et diffusion : CEMAGREF-DICOVA, BP 22, 92162 Antony Cedex, tél. : (1) 40 96 61 32 et CEMAGREF Aix-en-Provence, Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1, tél. : 42 66 93 10 - Diffusion aux libraires : Tec et Doc, 14, rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. : (1) 47 40 67 00. Prix : 150 F TTC