

# Méthodes de reconnaissance et de surveillance – Élaboration d'un diagnostic

Gérard Degoutte

Les digues dites fluviales sont destinées à protéger des zones rurales ou urbaines contre les inondations, et ne sont que rarement en contact avec l'eau. Nous parlerons donc de **digues sèches**. Les digues de navigation surélèvent les berges de canaux ou cours d'eau pour permettre un tirant d'eau suffisant. Elles sont au contraire en contact quasi permanent avec l'eau. Nous parlerons donc de **digues en eau**. Certains canaux de dérivation vers des usines hydro-électriques sont aussi surélevés par des digues en eau.

Ces deux types de digues ont pour caractéristique commune de s'opposer au passage de l'eau. L'eau, quant à elle, s'oppose aussi aux digues en cherchant à les saper, éroder, infiltrer, submerger. On s'amusera de constater que tous ces termes hydrauliques ont été repris en langage militaire. Rien d'étonnant, il y a bien un combat entre la digue et l'eau, et c'est une saine façon de considérer ainsi leurs relations avant d'en réaliser un diagnostic.

Les communications de cette session présentent une grande variété d'expériences et permettent de valider une méthodologie d'approche, même si aucune démarche type ne peut exister. Elles présentent également quelques modes de reconnaissance innovants et prometteurs.

Dans ce qui suit, nous ne considérerons qu'essentiellement les digues en terre, qui constituent le plus grand linéaire de digues. Certaines digues sont construites en béton ou en maçonnerie. Tout comme les digues en terre, elles sont posées sur

les alluvions. Elles méritent peut-être autant de vérifications et de soins mais relèvent de techniques très différentes et ne sont pas spécifiquement abordées dans ce rapport, ni par les auteurs de la session 2.

L'expérience plus ancienne de diagnostic des barrages en terre bénéficie *a priori* aux digues en terre. Les spécificités des digues en terre sont cependant évidentes : petite taille, conception souvent simplifiée (pas de drain, pas d'auscultation...), très grande longueur et donc surveillance plus difficile, vulnérabilité aux crues extrêmement élevée, politique de gestion de la végétation parfois différente... Il était donc utile de faire le point des méthodes de reconnaissance et de diagnostic et de voir celles, qui issues de l'expérience des barrages sont directement transposables, celles qui doivent être adaptées et celles qui sont nouvelles.

## Mécanismes de rupture ou de dégradation des digues

Une bonne connaissance de tous les mécanismes de dégradation ou de rupture des digues est un évident pré-requis. Nous en dressons un succinct résumé et renvoyons le lecteur à la bibliographie (Lino *et al.*, 2000 ; Degoutte, 2005) ainsi qu'à l'article de Royet et Lino ci-après.

Tout d'abord, il est essentiel de distinguer le cas des digues situées au bord du lit mineur. Berge du cours d'eau et parement amont de la digue sont alors en prolongement. Dans ce cas, tous les mécanismes

**Les contacts**  
CGGREF c/o Cemagref,  
3275, route de  
Cézanne, CS 40061,  
13182 Aix-en-Provence  
Cedex 5

1. On retrouve à nouveau un vocable employé dans le domaine militaire...

de déformation des berges (érosion par le courant, glissement rotationnel, effondrement) s'appliquent en fait à l'ensemble « berge + digue ». Quel que soit le mécanisme présent, érosion qui emporte les grains un par un, glissement ou effondrement qui les emportent en masse, la digue est susceptible d'être affaiblie par perte d'épaisseur et c'est évidemment une circonstance très défavorable. D'autant que ces mécanismes peuvent se succéder puisque l'érosion de pied de berge peut déclencher un glissement de la berge ou même de la berge et de la digue.

Les autres mécanismes courants concernent toutes les digues :

- érosion interne par renard ou suffusion (Fry *et al.*, 1997) ;
- érosion par surverse, généralement de la rivière (ou du canal) vers les terres, parfois des terres vers la rivière ou le canal ;
- l'érosion par batillage dû à la navigation, ou bien au vent dans le cas des fleuves les plus larges.

Les érosions interne ou par surverse conduisent très généralement à une rupture totale, c'est-à-dire à une brèche qui inonde la vallée avec une grande rapidité mettant en péril les occupations humaines et les personnes s'il y en a. Ces considérations préalables justifient les efforts entrepris pour améliorer la connaissance des digues et pour les conforter.

Si les digues sont des ouvrages linéaires semblant à première vue de constitution homogène, il faut être attentif à leurs nombreuses singularités qui sont souvent des sources de faiblesse : points bas, contacts maçonnerie/terre ou tuyau/terre, racines, terriers, ancienne brèche colmatée par des matériaux plus sableux...

### Méthodologie de diagnostic des digues existantes

L'article de Royet et Lino traite de la méthodologie de diagnostic des digues sèches et en précise

chaque étape. Ce texte est très complet et nous invitons vivement le lecteur à s'y reporter puis à découvrir la publication (Lino *et al.*, 2000) dont il est en grande partie issu. Le tableau 1 en reprend les étapes générales et nous paraît également applicable aux digues en eau.

Les connaissances préalables permettent de préciser quelles méthodes géophysiques ou géotechniques seront les mieux adaptées au cas étudié. Les reconnaissances, qu'elles soient géophysiques ou géotechniques, ont en commun qu'elles mesurent presque toutes la résistance<sup>1</sup> à la pénétration d'un champ (électrique...) ou à celle d'un objet (pénétromètre...), ou à celle d'eau (essai Lefranc, Perméafor...). Les premières méthodes sont non destructives et s'apparentent à une radiographie ou une échographie. Les secondes sont intrusives.

L'enchaînement des études tel qu'il est présenté est très classique. En particulier, les reconnaissances géophysiques sont utilisées en premier pour avoir une connaissance globale du tronçon étudié et pour implanter au mieux les reconnaissances géotechniques qui sont *a priori* plus coûteuses.

### Connaissances préalables

Il s'agit de l'ensemble des travaux préalables aux reconnaissances internes à la digue.

On y trouve en particulier :

- la recherche de témoignages et d'archives ;
- la topographie ;
- la bathymétrie ;
- les études hydrologique, hydraulique et géomorphologique ;
- l'inspection visuelle détaillée.

Nous évoquons ci-dessus les méthodes qui ont fait l'objet de communications, et pour le reste nous renvoyons à la bibliographie déjà signalée (Lino *et al.*, 2000).

► Tableau 1 – Démarche synthétique de la méthodologie de diagnostic des digues.

1 – Connaissances préalables (archives, topographie, hydraulique, examen visuel...)
2 – Reconnaissances géophysiques
3 – Reconnaissances géotechniques
4 – Diagnostic
5 – Avant-projet de confortement, ou définition d'un programme d'entretien

## L'étude hydraulique

L'étude hydraulique permet, en particulier, d'établir des lignes d'eau et de voir si le niveau altimétrique des digues est cohérent ou s'il existe des zones basses, qui seront submergées en priorité et qui donneront vraisemblablement lieu à des brèches. Le niveau général d'un endiguement peut s'avérer globalement incohérent si une évolution morphologique a eu lieu depuis l'époque de construction ou si des rehaussements non coordonnés ont été effectués.

Ainsi, la communication de Maurin et Pasquet relative aux digues de la Loire moyenne expose qu'un modèle 1D à casiers montre que la digue déverse dans la région d'Orléans bien avant que le déversoir de Jargeau construit en amont après la crue de 1866 n'entre en fonctionnement. Cela n'est pas totalement surprenant puisque les auteurs rappellent que cette digue avait été dimensionnée pour entonner sans déversement la crue de 1825, et que l'on sait l'importance des prélèvements de sable au siècle dernier qui ont entraîné de fortes érosions régressives et progressives. Le même modèle permet aussi de tester des aménagements et de juger de leur impact. Ainsi un modèle hydraulique est-il utile en phase 1 avant les reconnaissances à vocation géotechnique, mais aussi lors de la phase d'avant-projet de la phase 5.

Cette communication a aussi l'intérêt de nous rappeler que l'approche hydraulique est fondamentale, alors que l'on a trop souvent tendance à privilégier une approche uniquement géotechnique. Ajoutons, comme le fait la communication de Royet et Lino, que l'approche géomorphologique est également précieuse, tout particulièrement dans le cas des digues proches du cours d'eau, ce qui est souvent le cas des digues fluviales, mais aussi de quelques canaux navigables.

## L'inspection visuelle

L'inspection visuelle est un moment essentiel du diagnostic des digues. Nous recommandons qu'il soit réalisé par une équipe de deux personnes dont une au moins compétente en génie civil. Une des deux personnes doit avoir des compétences minimales en morphologie fluviale lorsque des tronçons de digue jouxtent la rivière, ce qui est (malheureusement) fréquent. Cette inspection permet de reconnaître les signes de désordre mécaniques ou hydrauliques (début de glissement, fuite, piézométrie élevée...). Elle permet

aussi de reconnaître des attaques extérieures qui peuvent devenir des problèmes : présence d'arbres (et donc de racines), présence de terriers.

Nous signalons au passage un point jamais signalé à notre connaissance : la présence de terriers nous renseigne à la fois sur la constitution mécanique de la digue et sur son régime hydraulique ! Un fouisseur ne creuse pas de terrier dans un terrain pulvérulent. Il connaît la position de la nappe et ses fluctuations.

La végétation arbustive met en danger les digues (voir plus loin le paragraphe *Vie de l'ouvrage* et la session 3) et la végétation arbustive ou buissonnante compromet gravement une bonne observation visuelle.

La communication de Mathurin et Perrier consacrée au diagnostic des protections en enrochements des digues du Rhône expose qu'une reconnaissance en continu des 244 km a constitué la première phase. Elle a permis de repérer les zones où des essais mécaniques devaient être réalisés et où des confortements étaient à envisager. Cette même communication enchaîne sur le diagnostic de la qualité des enrochements (vieillessement) et sur leur dimensionnement (voir plus loin le paragraphe diagnostic).

Mais, les reconnaissances visuelles ne permettent qu'une observation très partielle des pieds de berges, sauf pour les rivières à étiage très bas...

## La bathymétrie

... Une reconnaissance bathymétrique est donc souvent nécessaire. Ces techniques ont maintenant progressé et pourraient être plus souvent utilisées.

L'article ci-après de Perrier et Galissaires, également consacré aux berges du Rhône, expose les possibilités du **sonar latéral** (utilisation, contrairement à la méthode classique du sonar vertical, de deux transducteurs montés en balancier sur un poisson tracté par le bateau). Il a permis de reconnaître les affouillements de berge, les cavités dans des ouvrages et la nature ou la taille des matériaux.

Le dispositif mis en œuvre sur plusieurs sites est un sonar latéral 100-500 kHz, à balayage 50-200 m, couplé à un récepteur GPS différentiel. La profondeur d'investigation dans l'eau est comprise entre - 1 et - 15 m et le rendement *in situ* est élevé (2 m/s pour les ouvrages linéaires tels que les protections de pieds de digue).

Le résultat de la reconnaissance est une carte d'interprétation, typiquement au 1/1 000, sur laquelle les matériaux constitutifs de la berge et du fond sont différenciés.

Par rapport à la bathymétrie classique et à condition que la mise en œuvre ait lieu en période hivernale (absence d'algues) et que les structures à inspecter ne soient pas recouvertes de sédiments, le sonar latéral apporte des informations sur la nature des matériaux et permet même parfois d'évaluer la taille des éléments (exemple : enrochements) entrant dans la constitution des protections immergées. À ce titre, cette méthode du sonar latéral aurait également pu être présentée avec les méthodes géophysiques.

### Valorisation et cartographie des connaissances préalables

Dans le cas de grands linéaires de digues, les renseignements issus de l'observation visuelle peuvent enrichir une base de donnée couplée à un SIG (communication Maurel *et al.*) sur laquelle nous reviendrons plus loin).

### Premier diagnostic

Il peut être intéressant de réaliser un premier diagnostic (rapide) de la sécurité des divers tronçons de digue, avant même d'avoir entrepris des reconnaissances géophysiques ou géotechniques forcément coûteuses. Ce premier diagnostic permettra, au vu des renseignements disponibles, de préciser quels tronçons méritent un examen plus approfondi, et même de hiérarchiser leur importance. Le Cemagref avait déjà proposé cette démarche de diagnostic rapide et d'éventuel diagnostic approfondi dans le cas des barrages anciens (1992).

Finalement, le tableau 1 de la démarche synthétisée, peut être légèrement amendé (tableau 2) par adjonction d'une étape 1bis (facultative mais utile dans le cas des grands linéaires).

Cette idée est reprise par deux communications :

- dans la communication de Taisant et Duchesne, la CNR propose de valoriser l'examen des désordres des digues du Rhône en leur affectant une **note de gravité**. Une note de 1 à 5 est affectée à chaque désordre (tassement, fuite, piézométrie élevée, décrochement d'un talus...). En outre, une note de vulnérabilité de 1 à 3 est affectée à la zone de l'incident en fonction de la densité de l'occupation humaine « à l'abri » de la digue. Au total, par croisement de ces deux notes, une note de risque (dite de gravité globale) est affectée à chaque incident, sur une gamme de 0 à 6. Cette note permet de prioriser les interventions, ce qui est très utile pour un maître d'ouvrage gérant une grande longueur de digues ;

- Carré et Agresti propose une grille assez détaillée pour établir un facteur de risque compris entre 0 et 1,225 puis de le cartographier en quatre niveaux (faible, moyen, fort, très fort). Contrairement à la communication de Taisant et Duchesne (CNR), celle-ci se limite à l'aléa de rupture. Elle indique de manière détaillée comment cette note est calculée. Le facteur de risque global est une moyenne pondérée des facteurs de risque par mode de rupture. Le mode de rupture par déversement étant le plus probable dans l'application présentée (Rhône autour de Lyon), il a un poids de 80 %. Les facteurs de risque relatifs à un mode de rupture dépendent des sollicitations imposées à la digue pour une crue de référence (par exemple décennale), et de la résistance intrinsèque de la digue (ses dimensions, sa conception, son état).

### Reconnaissances géophysiques

La batterie des méthodes géophysiques connues dans le domaine des barrages est *a priori* applicable aux digues : sismique réflexion, méthodes électriques, méthodes électromagnétiques, méthode microgravimétrique (pour la recherche de fontis)...

► Tableau 2 – Démarche synthétique de diagnostic des digues incluant un diagnostic rapide préalable.

1 – <b>Connaissances préalables</b> (archives, topographie, hydraulique, examen visuel...)
1bis – <b>Diagnostic simplifié</b> (indice de risque de défaillance)
2 – <b>Reconnaissances géophysiques</b>
3 – <b>Reconnaissances géotechniques</b>
4 – <b>Diagnostic</b>
5 – <b>Avant-projet de confortement, ou définition d'un programme d'entretien</b>

Il s'agit par définition de méthodes non intrusives (ou non destructives) qui mesurent une propriété physique des sols (électrique, électromagnétique, optique, sismique). Les paramètres mesurés ne sont pas directement interprétables mais donnent des indications qui nous informent sur la nature des matériaux traversés et leur répartition.

Les digues ont la particularité évidente d'être des ouvrages de petite taille mais de grande longueur. On cherche donc à favoriser des méthodes à grand rendement. Il est alors particulièrement intéressant de réaliser deux types de mesures géophysiques :

- des mesures linéaires à grand rendement ;
- des mesures locales dans une zone de faiblesse repérée soit par l'étape initiale (reconnaissance visuelle), soit par la géophysique à grand rendement.

Les mesures à grand rendement fournissent classiquement un profil en long (ou parfois en travers), alors que les mesures locales fournissent un plan ou une coupe dans un plan vertical.

### Panneaux électriques

Dans leur communication, après avoir rappelé le principe des mesures par panneau électrique, Duchesne *et al.* expose les résultats obtenus avec la méthode dans plusieurs configurations distinctes de mise en œuvre sur les digues :

- caractérisation d'une zone de refus au pénétromètre dans le cadre de la recherche d'un ouvrage enterré (épi en enrochements) ;
- recherche d'une interface limon/gravier, siège de sous-pressions, et d'anciens drains en pied de talus côté aval d'une digue ;
- recherche de fuites dans une digue. L'une des trois expérimentations concernées intervenait dans le cadre de travaux de création d'un voile d'étanchéité pour remédier aux fuites. Les mesures par panneau ont été faites avant, puis après travaux. Dans les mesures après travaux en aval du voile, on a pu constater une évolution à la baisse des résistivités des matériaux où se développaient des fuites : ce qui a permis d'apprécier l'efficacité des travaux ;
- diagnostic d'une digue (à sec) de protection contre les crues, dotée d'un perré sur le parement côté fleuve, en complément d'une inspection visuelle.

Au final, si la méthode n'offre pas un rendement très élevé (5 jours pour une investigation 2D, 10 jours en 3D, pour 1 km, auxquels il convient de rajouter le temps d'expert pour le dépouillement et l'interprétation des mesures), elle se révèle d'application intéressante pour valider un diagnostic complexe ou pour approfondir localement le diagnostic d'une anomalie. Ces conclusions recourent celles faites pour cette méthode dans l'article de Fauchard et Mériaux, présenté ci-après.

### Comparaison des diverses méthodes applicables aux digues sèches

L'article ci-après de Fauchard et Mériaux résume un guide méthodologique réalisé dans le cadre du programme national Criterre (Fauchard, Mériaux, 2004). Il propose une association de méthodes géophysiques et géotechniques à rendement optimal permettant de participer à un diagnostic efficace d'une digue de protection contre les crues, en situation courante (c'est-à-dire « à sec », non soumise à la charge hydraulique). Il est rappelé que la situation « à sec » de l'ouvrage constitue justement l'une des difficultés du diagnostic. Elle insiste aussi – en lien étroit avec la teneur de la communication de Royet et Lino – sur le fait que la mise en service des outils géophysiques et géotechniques doit s'intégrer dans une démarche plus globale de diagnostic dans laquelle les phases préalables de recherches d'indices, de levé topographique, d'inspection visuelle et d'étude morphodynamique du cours d'eau tiennent une place capitale.

Parmi les méthodes géophysiques à grand rendement testées [électromagnétique à basse fréquence, géoradar, radio magnéto tellurique (RMT)], la méthode électromagnétique basse fréquence en champ proche Slingram se révèle comme particulièrement performante, surtout dans sa configuration « tractable » testée à titre exploratoire au printemps 2004 sur une digue de l'Agly. Toutefois, la méthode RMT peut donner des renseignements complémentaires.

Les méthodes géophysiques approfondies (panneau électrique, sismique réfraction...) sont appliquées aux secteurs choisis à l'aide des méthodes à grand rendement.

Enfin, cette communication annonce la parution prochaine d'un guide technique pour la mise en œuvre et l'interprétation de ces méthodes, à l'occasion du séminaire de clôture du projet national Criterre (18/11/2004) qui a servi de cadre aux recherches des auteurs.

Ces travaux aident l'utilisateur à choisir les méthodes les plus appropriées à ses digues fluviales ; ils recommandent d'utiliser plusieurs méthodes qui peuvent affiner le diagnostic. Le même type de conclusion s'avèrera applicable, nous le verrons, aux digues en eau, même si évidemment d'autres méthodes vont s'ajouter, comme par exemple celles qui recherchent des fuites.

### Juxtaposition de diverses méthodes de détection de fuites

Justement, dans sa communication, Jean-Paul Blais présente le cas d'un diagnostic approfondi d'une zone fuyarde d'un barrage en remblai pour laquelle une batterie de méthodes géophysiques a été mise en œuvre. Bien que cette communication concerne un barrage, elle est tout à fait adaptable à une digue en eau.

L'originalité de la démarche expérimentale réside en particulier dans le fait que ces méthodes ont été déployées en deux phases successives :

- situation « sèche » (résurgence non active), grâce à une cote du plan d'eau abaissée : panneaux électriques, méthode électromagnétique et radar géologique ;
- situation de résurgence active : mesures de potentiel d'électrofiltration (polarisation spontanée), panneaux électriques, sondages électriques en continu avec injection de sel, géoradar et mesures acoustiques.

On notera qu'aucun outil de reconnaissance géotechnique n'a été mis en œuvre et que le travail a consisté à comparer les résultats des méthodes géophysiques déployées, soit dans la même situation, soit d'une situation à l'autre.

Dans ce cadre, des résultats intéressants ont notamment été obtenus :

- avec le panneau électrique de la situation « sèche » à la situation « à résurgence active », où on a assisté à une chute de la résistivité apparente dans les terrains superficiels (1 à 3 m) sièges des circulations d'eau ;
- avec le dispositif de sondages électriques en continu, pour lequel un effet équivalent a été observé, en situation de « résurgence active », sous l'effet de l'injection du sel. Ceci a permis de caractériser la zone de fuites, ce que les mesures de potentiel d'électro-filtration n'avaient pas réussi à faire en l'absence d'entonnement privilégié en amont.

Pour le reste, on a pu constater de bonnes corrélations de résultats entre les méthodes électriques et électromagnétiques.

### Reconnaitances géotechniques

Les méthodes de reconnaissance géotechniques sont classiques et identiques à celles utilisées pour les barrages :

- sondages carottés valorisés par des essais d'eau de type Lefranc et par des essais en laboratoire ;
- équipement éventuel en piézomètre ;
- pénétromètre statique ou dynamique, pressiomètre, Phicomètre, Perméafor ;
- sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage, équipé éventuellement en piézomètre.

Nous ne présentons que l'une d'entre elles, qui a paru particulièrement intéressante pour l'application aux digues – le pénétromètre – et nous présentons une méthode moins classique, la thermométrie qui paraît prometteuse.

### Pénétromètre léger

Les travaux présentés par Duchesne *et al.* s'inscrivent dans une étude de diagnostic de sensibilité au séisme sur une digue d'aménagement CNR au bordure du Rhône. Ils interviennent suite à une première campagne de reconnaissance avec le pénétromètre lourd SPT, qui avait révélé des zones de très faible résistance dans les limons de fondation de la digue.

Le recours au pénétromètre dynamique léger Panda a permis, dans un premier temps, en multipliant les points de sondage (7 m de profondeur), de mieux localiser ces zones de fondation où les résistances de pointe tombent à moins de 0,5 MPa. Les corrélations avec quelques essais de caractérisation mécanique (cohésion, taux de compactage) en laboratoire de mécanique des sols sont satisfaisantes.

Dans un second temps, les auteurs ont cherché à quantifier la stabilité sismique des matériaux reconnus. Cette partie de la communication relève donc plutôt de l'étape 4, diagnostic que nous abordons plus loin (Vérification de la stabilité au séisme).

L'appareil peut être mis en œuvre dans la plupart des sols, à l'exception des matériaux graveleux. Il peut être considéré dans la catégorie des

reconnaisances à rendement élevé, au même titre que les méthodes géophysiques.

Notons au passage que cette communication montre un fait bien connu et parfois oublié : dans un remblai à vocation hydraulique, **il y a interdépendance entre les aspects mécaniques et les aspects de l'hydraulique interne**. Une faiblesse mécanique peut être due à un début d'érosion interne. Aussi, il ne faut pas s'étonner de voir qu'un appareil pénétrométrique peut aussi permettre de suspecter la présence de zones fuyardes.

### Thermométrie classique

#### – Fibre optique

Ces procédés concernent la recherche ou la caractérisation de fuites et sont donc réservés aux digues en eau.

L'article de Fry présente deux techniques traditionnelles **d'auscultation thermométrique** dans les ouvrages en remblai :

- la mesure unique dans des tubes vibrofoncés en vue d'une caractérisation immédiate de zones fuyardes ;
- des mesures répétées dans le temps dans des piézomètres, qui permettent, au terme d'une année d'auscultation mensuelle, d'évaluer le débit de fuite et la perméabilité des zones d'écoulement préférentiel.

Une application à la digue de Kembs est décrite. En conclusion, la technique s'avère fiable, précise et plus facile à interpréter que les autres méthodes géophysiques telles que l'électro-filtration, les traçages...

L'une des principales limites des techniques précédentes réside dans le faible nombre de points de mesure comparé au linéaire très important à ausculter. L'usage de la fibre optique permet de résoudre cette difficulté.

Aussi, dans sa communication, le même auteur dresse un historique des premières applications de la thermométrie par **fibre optique** dans le domaine des ouvrages hydrauliques : en dix ans, plus de 35 sites de barrages ou digues ont été équipés en Europe.

Le principe de la mesure en continu de la température le long d'une fibre optique est présenté. Puis l'auteur décrit l'expérimentation conduite en 2002 et 2003 sur le site du

canal d'Oraison, au pied du talus aval duquel a été enfoui un dispositif de fibres optiques de plus de 2 km de longueur et relié à la centrale d'acquisition (laser et interféromètre). Les deux modes de mesure – passif (mesure « directe » de la température) et actif (chauffage préalable de la fibre) – ont été testés avec succès pour détecter des fuites faibles.

La priorité des travaux porte maintenant sur la fiabilisation du système d'acquisition dans l'objectif d'aboutir à une véritable continuité des mesures, qui seule permettra la mise au point d'un dispositif d'alarme.

### Diagnostic

#### Diagnostic rapide

#### et diagnostic approfondi (ou complet)

Rappelons tout d'abord qu'une méthode de diagnostic rapide a été exposée dans un paragraphe précédent (Premier diagnostic). Ce paragraphe traite du diagnostic complet qui doit conclure sur la stabilité de l'ouvrage aux plans mécanique et hydraulique. Nous avons déjà signalé que ces deux aspects étaient interdépendants, et il faudra s'en souvenir lors du diagnostic, même si on découple les vérifications. Il faut également conclure sur la stabilité ou l'intégrité des composants de la digue (protections en enrochements, dalles de béton, rideau parafouille, muret...).

#### Considérations méthodologiques

L'article de Royet et Lino déjà cité au tout début donne des indications utiles pour l'étape clé du diagnostic complet, établi à l'issue des diverses reconnaissances :

- la modélisation numérique doit rester simple. Elle doit vérifier la sensibilité des résultats aux indéterminations de diverses natures (ce qui est bien trop rarement fait) ;
- le diagnostic de l'aléa d'érosion interne n'est pas encore satisfaisant ;
- la méthode bien connue de Lane n'est pas adaptée aux digues meubles sur fondation meuble ;
- la comparaison du gradient à un gradient critique est plus satisfaisante, mais il n'y a pas de consensus sur le coefficient de sécurité à adopter.

### Stabilité des protections de berge

Dans le cas des protections de berge, nous avons déjà évoqué la méthode d'examen développée par CNR. Cette même communication enchaîne sur le diagnostic de la qualité des enrochements (vieillesse) et sur leur dimensionnement. Ce travail est tout à fait intéressant. D'une part, il met en évidence l'importance de la durée d'ensoleillement sur l'altération des blocs et propose un essai de caractérisation. D'autre part, des formules de dimensionnement de la taille des enrochements pour résister au courant et aux vagues ont été validées sur modèle physique.

### Vérification de la stabilité au séisme

Cette étape est rarement nécessaire, sauf pour des digues de grande hauteur lorsque la rupture intéresse la sécurité publique.

Nous avons déjà présenté l'article de Duchesne *et al.* relatif au pénétromètre léger. Les auteurs ont cherché à utiliser les résultats issus des essais au PANDA pour quantifier la stabilité sismique des matériaux reconnus. Dans les zones saturées et pour un matériau donné, il apparaît que la résistance de pointe se corrèle bien avec le coefficient de sécurité à la liquéfaction.

### Utilisation d'un système d'information à référence spatiale (SIRS)

Dans la démarche de diagnostic, un SIRS a un rôle particulier, c'est un outil d'aide et non une méthode (bien évidemment). Nous le présentons néanmoins ici car elle peut valoriser aussi des résultats d'investigations, l'archivage étant un point clé du diagnostic. De plus, la possibilité de pouvoir comparer des résultats de diagnostics successifs permet d'apprécier le vieillissement et aide à détecter des évolutions dangereuses. Mais le SIRS peut intervenir aussi en étape 1bis après les reconnaissances visuelles.

Cet outil (Maurel *et al.*) concentre sur un seul support un ensemble de données généralement disparates et non regroupées dans la mémoire d'une même personne, ce qui constitue une aide précieuse au diagnostic et à la prise de décision.

La méthodologie utilisée concerne des digues fluviales mais pourrait être adaptée à des digues de canaux.

De plus l'application est actuellement concentrée sur l'ouvrage hydraulique (la digue, la rivière, ses

annexes techniques telles que fossé, piste...) et n'aborde pas la description des zones protégées et leur vulnérabilité (description géographique, type d'occupation, valeur des terrains ou du bâti, possibilité d'évacuation des personnes en cas d'inondation du casier...). Il est tout à fait envisageable dans l'avenir de développer l'application dans ce sens, comme cela a été testé sur une maquette en 1999.

### Vie de l'ouvrage

L'article de Hoonakker présente le retour d'expérience des services de contrôle du ministère de l'Industrie sur les digues du Rhône et du Rhin. Ce retour d'expérience analyse le rôle de l'exploitant (qui est de surveiller) et celui du service de contrôle (qui est de contrôler que l'exploitant surveille et entretient correctement ses ouvrages). Cette apparente boutade vise à pointer du doigt que ce distinguo est complètement fondamental et finalement plus subtil qu'il n'y paraît. Il est particulièrement intéressant de voir en particulier que la surveillance la meilleure se fait à deux niveaux, un niveau de proximité, et un niveau plus expert, moins impliqué au quotidien et qui apporte le regard neuf. Ceci peut avoir l'air banal, mais c'est également fondamental et rarement effectué, et d'ailleurs pas toujours possible pour les maîtres d'ouvrage éparpillés, ne parlons pas des maîtres d'ouvrage inconnus. Nous avons souvent eu l'occasion de constater dans le domaine des barrages que le regard tout à la fois nouveau et expert est précieux, tant l'accoutumance au risque prend rapidement le dessus... Bien entendu, le rôle du service de contrôle ne sera pas exactement le même selon que le maître d'ouvrage dispose en son sein de cette capacité d'expertise comme pour le Rhin ou le Rhône, ou non.

Si l'action du service de contrôle n'apparaît pas dans le déroulement d'un diagnostic, elle est cependant essentielle par exemple pour faire émerger la nécessité d'un diagnostic.

Signalons aussi une partie très intéressante de cette communication concernant la gestion de la végétation. Ce aspect soulèvera sûrement de nombreux débats intéressants lors du colloque et relève plus spécialement de la session 3. Signalons néanmoins que la position de base doit être d'interdire toute végétation arbustive sur la digue compte tenu des risques d'érosion interne encourus à cause des racines. Contrairement à une idée trop répandue, ce risque ne se limite pas aux arbres tronçonnés ou aux



arbres morts, car un arbre vivant a aussi des racines mortes. Dans le cas de ces deux grands fleuves, le parti a été de composer intelligemment entre une exigence de sécurité et un souci écologique. Nous invitons le lecteur à découvrir cela dans la communication et nous signalons que cette position n'est pas transposable telle quelle à des digues de plus petites dimensions que celles du Rhône ou du Rhin, hautes de 8 à 15 m et très larges.

Le contrôle des digues des grands fleuves est pratiqué depuis de nombreuses années au titre de la circulaire 70-15 bien connue dans le domaine des barrages depuis 1970, puis d'une circulaire de 1997 du ministère de l'Industrie relative aux ouvrages hydroélectriques de moyenne importance. Il serait particulièrement important d'en tirer le retour d'expérience pour le contrôle – tout nouvellement instauré – des digues fluviales qui ont beaucoup de points communs.

## Conclusion

Cette session a eu pour cœur les reconnaissances, qu'elles soient géophysiques ou géotechniques.

Une première conclusion est que la batterie des méthodes envisageables et envisagées est large, en pratique plus que pour les reconnaissances de barrages en terre.

Plusieurs travaux à caractère méthodologique ont été réalisés ou vont l'être (voir bibliographie à la fin de ce rapport). Déjà, on peut pointer, de manière rapide et presque caricaturale :

- que l'utilisation de méthodes complémentaires est assez généralement une source d'enrichissement (géophysique + géophysique ou géophysique + géotechnique) ;
- que certaines méthodes sont bien adaptées à la problématique des digues et/ou prometteuses : méthode électromagnétique de type SLINGRAM, bathymétrie au sonal latéral, fibre optique...

Cela joint à l'effort entrepris par le ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD) et par divers organismes techniques ou de recherche, gageons que la sécurité des digues devrait singulièrement s'améliorer dans la décennie à venir. □

---

## Remerciement

Ce rapport général a bénéficié d'une relecture constructive par Patrice Mériaux et de ses conseils avisés.

---

**Bibliographie**

- FAUCHARD, C., MÉRIAUX, P., 2004, *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues ; guide méthodologique et de recommandations pour la mise en œuvre et l'interprétation*, programme national Criterre, IREX, Cemagref éditions.
- CETMEF, 2002, *Ouvrages de navigation et écoulements souterrains, phénomènes, surveillances, prévention et réparations*, 143 p.
- CETMEF (ex. STCPMVN), 1986, *Étude des anciennes digues de canaux, rapport de synthèse*, 146 p.
- CETMEF (ex. STCPMVN), 1996, *Digues anciennes de canaux ; utilisation des méthodes géophysiques pour la reconnaissance des digues de voies navigables et cours d'eau*.
- DEGOUTTE, G., 2005, *Hydraulique et morphologie fluviales appliquées au diagnostic, à l'aménagement et à la gestion des rivières*, à paraître, 300 p.
- FRY, J.-J., DEGOUTTE, G. et al., 1997, *Érosion interne : typologie, détection et réparation*, Comité français des grands barrages, *Barrages et réservoirs*, bulletin n° 6 spécial congrès CIGB Florence, 126 p.
- LINO, M., MÉRIAUX, P., ROYET, P., 2000, *Méthodologie de diagnostic des digues, appliquée aux levées de la Loire moyenne*, Cemagref éditions, 224 p.
- MÉRIAUX, P., ROYET, P., FOLTON, C., réédition 2004, *Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires : surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*, MEDD, Cemagref éditions, 199 p.