

# Etat des méthodes éprouvées et innovantes pour la surveillance des digues fluviales et maritimes.

Nadim Charles<sup>1</sup>, Paul Royet<sup>2</sup>, Patrice Mériaux<sup>2</sup> & Christophe Duval<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), [charles-edouard.nadim@ineris.fr](mailto:charles-edouard.nadim@ineris.fr)

<sup>2</sup> Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour VEnvironnement et l'Agriculture (IRSTEA), [paul.royet@irstea.fr](mailto:paul.royet@irstea.fr)

## Résumé

Aujourd'hui la surveillance des digues de protection contre les inondations est essentiellement assurée par examen visuel. La surveillance instrumentale est peu développée bien qu'elle puisse être considérée comme une approche complémentaire pertinente qui permettrait de pallier les limites pratiques de l'examen visuel : difficultés d'établir une surveillance continue dans le temps et sur des linéaires importants avec des ressources humaines limitées, notamment en période de crue.

Afin d'évaluer les apports potentiels de méthodes instrumentale à la surveillance des digues, un état de l'art a été réalisé. Il a eu pour objectif de présenter de manière synthétique les avantages et limites de chaque méthode au regard des mécanismes de rupture susceptibles d'être détectés. Les méthodes ont été sélectionnées en fonction de critères opérationnels :

- en premier lieu leur capacité à établir un diagnostic précis vis-à-vis d'un risque donné ;
- leur grand rendement, caractéristique essentielle pour surveiller un objet étendu ;
- les moyens et le temps nécessaires au traitement et à l'interprétation des données. Cet aspect deviendra notamment critique en période de crue.

Ont été considérées à la fois les techniques éprouvées et les méthodes innovantes, parfois encore au stade de R&D. Dans ce cas la maturité de la technologie a été évaluée au regard des retours d'expérience identifiés. Enfin la notion de coût est abordée.

Chaque technique retenue est décrite, la conclusion faisant la synthèse des constatations faites.

Cet état de l'art pourra être consulté de manière plus complète au travers du rapport public remis au MEDDE et disponible à la date de parution de cette communication.

## Abstract

Nowadays flood protection dikes surveillance is mostly ensured by visual inspection. There is only few instrumental monitoring whereas it could be used as a relevant approach, complementary to visual inspection. In particular instrumental monitoring can offer continuous and/or wide range

surveillance, which is especially useful when dealing with dikes. Instrumental monitoring methods can also help optimizing visual surveillance during flood, when human resources can be scarcer than usual.

An overview of the tried and tested surveillance techniques as well as the innovative ones has been made. The objective was to summarize the pros and cons of each technique toward the main dikes failure mechanisms. The techniques have been chosen regarding their range, efficiency and capacity of producing a relevant and precise diagnosis. The development level has also been evaluated through the feedbacks that could be identified. A specific focus is also given on the time and resources needed for data processing and interpretation.

## Introduction

### Mission de la surveillance des digues

Les digues de protection contre les inondations ont pour objectif d'éviter ou de limiter les conséquences d'une crue sur des enjeux humains et matériels. Pour remplir cette fonction, une digue doit :

- être correctement dimensionnée pour protéger de l'inondation jusqu'au niveau dit « de protection » et, au-delà, rester totalement stable jusqu'au niveau dit « de sûreté » ;
- maintenir sur le long terme ses caractéristiques initiales, en particulier son niveau de crête et sa résistance.

La surveillance de digues concerne exclusivement le second point : sa mission est en effet de réaliser le suivi des caractéristiques physique de la digue lui permettant de protéger des enjeux vis-à-vis d'un niveau de crue donné. La validation ou la remise en question du dimensionnement initial d'une digue ne concerne pas la surveillance : seul l'historique des niveaux d'eau permet de vérifier l'adéquation entre les caractéristiques initiales d'une digue et la protection vis-à-vis des crues à venir.

### Problématiques inhérentes à la surveillance des digues

Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages qui présentent de nombreuses spécificités, à la fois structurelles et d'exploitation. Certaines de ces spécificités compliquent la surveillance des digues de manière importante.

Les digues sont peu sollicitées. Par nature, une digue de protection contre les crues a vocation à avoir une ligne de crête au-dessus du niveau d'eau habituel afin de pouvoir contenir une future montée des eaux. Une grande proportion du corps de digue, si ce n'est la totalité, est donc hors eau une grande partie de la durée de vie de l'ouvrage, les crues les plus importantes étant aussi les plus rares. Cette absence de conditions de crue régulières bride drastiquement le retour d'expérience que l'on peut obtenir sur les méthodes de surveillance des digues. Ce point est d'autant plus critique que la méthode considérée est nouvelle ou ne profite pas d'une validation pertinente dans un domaine. De plus, en période de crue, l'environnement d'une digue et les contraintes qui lui sont exercées évoluent de manière importante et rapide. Ce changement de conditions brutal s'avère être une source de difficultés techniques et d'interprétation de mesure dans le cas de certaines méthodes instrumentales.

Les digues sont des ouvrages à grands linéaires, pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de long pour les plus importantes. Beaucoup de méthodes de mesure instrumentales ayant un rayon d'action ou de validité limité, on imagine aisément la difficulté que soulève cette géométrie particulière, ne serait-ce que d'un point de vue financier. La capacité d'une méthode instrumentale à caractériser une digue sur un grand linéaire avec un investissement en temps, en moyens matériels et en main d'œuvre acceptable sera donc un avantage décisif. On parlera alors de méthode à grand rendement. Ce linéaire important empêche également de pouvoir profiter pleinement du retour d'expérience de la surveillance des barrages, domaine très bien documenté mais qui concerne des ouvrages hydrauliques plus « ponctuels ». Cependant nous pouvons bénéficier du retour d'expérience sur les digues de canaux, bien que relativement récent et encore peu abondant.

Dans le droit français, la protection contre les inondations relève de la responsabilité du propriétaire riverain. La très grande diversité des propriétaires implique une diversité des maîtres d'ouvrage équivalente : propriétaires fonciers particuliers, associations de propriétaires, collectivités locales, État, établissements publics ou privés concessionnaires de l'État... Aujourd'hui seuls trois gestionnaires regroupent un linéaire de digues de plusieurs centaines de km : l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche, le Syndicat mixte interrégional d'aménagement des digues du delta du Rhône et de la mer (SYMADREM) et la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Centre (DREAL Centre) représentant à eux trois environ 1000 km de digues pour un parc français estimé à environ 8000 km. Cette gestion dispersée pour les 7000 km restant implique une difficulté de mutualisation des moyens techniques et financiers, ce qui complique nécessairement la mise en œuvre de stratégies de surveillance à grande échelle. Ceci est d'autant plus critique dans le cas des propriétaires de petite taille ou tout

simplement inconnus. De fait, les méthodes les plus coûteuses seront difficilement applicables à une proportion non négligeable de digues.

Enfin, beaucoup de digues françaises sont des ouvrages anciens, parfois multiséculaires. Cette ancienneté peut créer des complications vis-à-vis d'une stratégie de surveillance à deux points de vue :

- Les ouvrages anciens sont parfois peu ou pas du tout documentés, privant le gestionnaire d'informations importantes sur la structure de la digue ;
- Certaines techniques instrumentales sont plus aisées à déployer au moment de la construction de l'ouvrage, leur intégration a posteriori étant délicate techniquement et donc financièrement. C'est notamment le cas de la mesure de température et/ou de déformation par fibre optique qui implique le déploiement d'une fibre au sein de la digue et sur tout son linéaire.

#### **Constat de la surveillance à ce jour**

Aujourd'hui, la surveillance des digues, quand elle est effectivement réalisée, est essentiellement assurée par examen visuel périodique. La surveillance visuelle présente l'avantage primordial de permettre une confrontation directe entre l'objet d'étude et le spécialiste [1]. Une digue est un ouvrage hétérogène et étendu, souvent situé dans un contexte naturel et changeant. Les causes et les conséquences des évolutions d'une digue et de son environnement ne peuvent souvent s'apprécier pleinement qu'en les constatant *in situ*. L'approche de terrain reste strictement incontournable.

Pour autant la surveillance visuelle présente certaines limites :

- Elle est ponctuelle dans le temps, aucune information n'est disponible entre deux interventions. Ainsi, certaines évolutions brusques peuvent ne pas être détectées durant une période plus ou moins importante selon le rythme de l'examen (ex : remontée de fontis, travaux non déclarés) ;
- Elle nécessite l'intervention sur place de personnel expérimenté (garde digue par exemple). En période de crue, cela soulève à la fois le problème de la disponibilité d'intervenants durant une période particulièrement mobilisatrice et de leur sécurité, surtout s'il s'agit de personnels moins expérimentés mobilisés exceptionnellement ;
- Pour assurer un suivi de routine régulier, le coût de mise en œuvre de la surveillance visuelle peut s'avérer non négligeable ;
- Enfin, certaines caractéristiques physiques peuvent être délicates à caractériser lors d'une surveillance visuelle, et ce même avec l'apport de mesures instrumentales ponctuelles. En particulier, l'érosion interne d'une digue présente par nature peu ou pas de signes extérieurs en dehors des périodes de crue et ne peut pas être suivie aisément.

## Quel apport de la surveillance instrumentale ?

Compte tenu de ces limites, qui ne contredisent pas l'apport essentiel de la surveillance visuelle, il est intéressant d'évaluer l'apport d'une surveillance instrumentale en complément.

Dans le cadre d'une opération de recherche financé par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), un état de l'art a été réalisé sur les différentes techniques de mesure existantes à ce jour (c'est-à-dire les méthodes permettant la caractérisation des paramètres physiques traduisant la capacité d'une digue à remplir sa mission de protection vis à vis d'un niveau d'eau donné). Cet état de l'art concernent à la fois les techniques éprouvées ou au stade de recherche et développement, pour la surveillance des digues.

Pour chaque technique décrite, y compris la surveillance visuelle, il s'agissait de mettre en évidence les avantages et les limites en regard avec le champ d'application, c'est-à-dire le ou les mécanismes de rupture surveillés.

De nombreuses méthodes instrumentales permettant de suivre telle ou telle caractéristique physique d'une digue, au-delà de la simple pertinence vis-à-vis des mécanismes de rupture, le choix des techniques décrites a été fait en tenant compte des spécificités de la surveillance des digues citées ci-dessus :

- La technique permet-elle de suivre une évolution des caractéristiques de la digue tout au long de sa vie ou bien n'est-elle pertinente qu'en période de crue ? La question sous-jacente est celle de l'anticipation de la rupture permise par la méthode de surveillance ;
- La technique permet-elle une surveillance à grand rendement ? Compte tenu de la géométrie linéaire étendue d'une digue, la capacité d'une méthode à réaliser une surveillance à grande échelle en un délai acceptable est une caractéristique essentielle.

Les aspects de coûts de fourniture, d'installation (dans une digue préexistante) et d'exploitation sont également évoqués, afin de permettre une première évaluation de l'applicabilité des ces méthodes dans des conditions de maîtrise d'ouvrage données.

Chaque technique retenue est décrite synthétiquement dans les sections suivantes. Un récapitulatif des observations faites est donné en conclusion.

Cet état de l'art pourra être consulté de manière plus complète au travers du rapport publique remis au MEDDE et disponible à la date de parution de cette communication.

## Surveillance visuelle

**Mécanismes de rupture surveillés** : Tous mécanismes.

**Principe** : Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue se révèlent par des indices de surface [1] : mouvements de terrain, érosions, ravinements, végétation singulière, terriers, etc. La surveillance visuelle constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et s'avère incontournable pour établir un état initial (examen initial) de la digue puis en permettre le suivi ultérieur (surveillance programmée). La surveillance visuelle consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue, en répertoriant toutes les informations visuelles sur les désordres ou les présomptions de désordre. En crue, ou en post-crue, il s'agira d'évaluer les désordres liés à l'état "en charge", actuel ou passé, de la digue, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage.

**Anticipation de la rupture de digue** : Bonne anticipation pour tous les mécanismes, mais uniquement vis-à-vis d'une crue à venir. Pour la surveillance en crue, le délai d'anticipation est variable selon le mécanisme : faible pour la surverse, moyen à bon pour les autres.

**Rayon d'action/Mobilité** : La surveillance visuelle est évidemment mobile. Elle s'applique à toutes les parties visibles de la digue et de son proche environnement.

**Collecte/traitement** : La collecte des données se fait par un opérateur sur le terrain. Le rendement est de 1 à 5 km/jour pour 2 ou 3 opérateurs. Les données sont disponibles en temps différé, sauf en période de crue avec liaison radio ou téléphonique vers une cellule de crise. La moitié environ du temps sur le terrain est nécessaire pour traiter les données acquises.

**Maturité/fiabilité** : La surveillance visuelle bénéficie d'un très grand retour d'expérience et est tout à fait mature.

**Limites principales** : Une grande expérience est nécessaire de la part des opérateurs. Aucune information directe n'est obtenue sur l'intérieur de la digue ou sur les parties immergées. La végétation peut créer une gêne. En période "à sec" les indices sont susceptibles d'être effacés. En période de crue ou de post-crue, il peut être difficile de satisfaire les contraintes de temps, l'intervention en conditions acceptables de sécurité des opérateurs exigeant de plus une préparation soignée des interventions.

**Indication de coût de mise en œuvre** : Le coût de la surveillance visuelle peut être estimé à 250 à 1000 €/ km selon état d'entretien ou de dégradation de la digue.

## Limnimétrie

**Mécanisme de rupture surveillé :** Surverse.

**Principe :** La connaissance du niveau d'eau est une information évidemment essentielle en cas de crue, en particulier pour la gestion du risque de surverse. Plusieurs technologies sont disponibles pour réaliser cette mesure. Parmi elles, la sonde de pression et le radar sont particulièrement intéressants techniquement.

La sonde de pression est immergée, et solidement protégée, en un point fixe connu. Pour une gamme de vitesse donnée, la mesure de pression donne la hauteur d'eau.

Le radar est placé en un point fixe connu au-dessus du cours d'eau et mesure la distance avec la surface. Le radar est insensible à la température et est moins vulnérable puisque normalement hors d'eau.

Pour que ces mesures soient pertinentes la relation entre niveau d'eau en fleuve et niveau d'eau à la digue doit être bien connue.

**Anticipation de la rupture de digue :** L'anticipation de la surverse est fonction du rythme de montée des eaux.

**Rayon d'action/Mobilité :** Mesure fixe et strictement locale.

**Collecte/traitement :** Collecte immédiate des données, transmission automatique possible. Aucun traitement nécessaire, les mesures sont immédiatement exploitables.

**Maturité/fiabilité :** Technologies éprouvées. Précisions typiques :  $\pm 5$  à 10 mm (sonde de pression),  $\pm 5$  mm (radar), ce qui est largement satisfaisant pour le suivi d'une crue.

**Limites principales :** Sonde de pression. La mesure présente une dérive dans le temps (hystérésis), un recalage est nécessaire tous les mois. Le capteur nécessite une importante maintenance. La sonde étant immergée, elle ne peut pas être déployée en zone sèche et son tube de protection est particulièrement vulnérable aux débris flottant lors des crues. Radar. Le radar souffre d'une «zone aveugle» dans les quelques dizaines de cm immédiats : si le niveau de crue entre dans cette zone, la mesure se dégrade fortement. La précision diminue avec la distance capteur/surface. L'utilisation d'un duo capteur radar (niveau d'eau normal et haut) et sonde de pression (niveau bas) peut pallier ce problème.

**Indication de coût de mise en œuvre :** Sondes de pression : capteur peu cher (< 100€ pièce). Génie civil : solide protection de la sonde nécessaire. Radar : 1-2 k€ par capteur. Génie civil : pose sur un ouvrage existant ou pose d'un support. Ces deux technologies proposant des signaux de sortie de capteur standards, des unités d'acquisition peu chères peuvent être utilisées (quelques k€, voire moins pour une mesure sans télétransmission).

## Fibre optique

**Mécanismes de rupture surveillés :** Erosion interne, glissement de talus, tassement différentiel.

**Principe :** Une fibre optique est enfouie le long d'une digue, sur une longueur pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de kilomètres. A l'extrémité de cette fibre optique, ou à partir de relais intermédiaires, un signal lumineux calibré est émis. L'analyse du contenu fréquentiel du signal renvoyé permet de calculer la température et/ou la déformation locale tandis que le temps de parcours du signal indique la position du paramètre ainsi mesuré. Une mesure distribuée de la température [2]-[4] et de la déformation [5] est donc obtenue tout au long de la fibre optique qui est à la fois capteur et vecteur du signal de mesure. Son utilisation permet, contrairement aux instruments utilisés classiquement, d'avoir une vue à la fois globale et détaillée de la zone instrumentée.

**Anticipation de la rupture de digue :** La rupture a été anticipée de 2 jours par mesures de température et de déformation au cours de l'expérimentation Ijkdijk.

**Rayon d'action/Mobilité :** Dispositif fixe. Mesures distribuées tout le long de la fibre. Détection d'une fuite jusqu'à quelques décimètres autour de la fibre.

**Collecte/traitement :** Collecte immédiate des données, transmission automatique possible. L'interprétation du signal en déformation est relativement simple (pour peu que l'on dispose de points de références fixes bien connus) tout comme celle du signal en température en méthode active (chauffe de la fibre pour mettre en valeur les phénomènes de convection). Le traitement devient cependant complexe pour la mesure de température en méthode passive, un historique de mesures conséquent et l'emploi d'une approche physico-statistique ou de traitement du signal devenant nécessaires.

**Maturité/fiabilité :** Les mesures de température et de déformation peuvent être considérées comme matures et fiables. Des précisions de 0,1°C en température et de 0,01% en déformation [6] peuvent être obtenues.

**Limites principales :** Le coût et la technicité de la mesure sont les principales limites de la surveillance par fibre optique. La difficulté de l'interprétation des mesures de température (en mode passif) et de la quantification des fuites implique un délai dans le processus de suivi ainsi que la nécessité de personnel expérimenté.

**Indication de coût de mise en œuvre :** La mise en œuvre d'une fibre optique relève d'un investissement initial important, d'autant plus qu'elle n'aura pas été prévue dès la conception de la digue. L'ordre de grandeur est de quelques dizaines de k€ au kilomètre.

## Imagerie thermique

**Mécanisme de rupture surveillé :** Erosion interne.

**Principe :** Tout corps émet un rayonnement électromagnétique infrarouge dont l'intensité est fonction de la température du corps en question et de son émissivité (capacité à réémettre l'énergie absorbée). En mesurant précisément le rayonnement émis par un corps donné, ponctuel ou étendu, et si l'on connaît l'émissivité de ce corps, il est possible d'en tirer une image thermique. La mesure est réalisée par une caméra thermique (ou caméra infrarouge).

En période de crue, une fuite au sein de la digue provoque une anomalie thermique, la température de l'eau étant différente de celle du corps de digue. Si cette fuite est suffisamment importante ou superficielle, un gradient thermique atteint la surface de la digue et est donc susceptible d'être identifié par imagerie thermique.

**Anticipation de la rupture de digue :** Anticipation moyenne : détection possible d'une érosion interne lorsque la digue est en eau, soit essentiellement en crue.

**Rayon d'action/Mobilité :** La zone caractérisée est celle visée, mais le dispositif très mobile, la caméra thermique pouvant être soit aéroportée, soit au poing. Un dispositif aéroporté offre évidemment un rendement maximal. Prise au poing, la caméra peut faciliter la surveillance visuelle.

**Collecte/traitement :** La collecte nécessite un déplacement sur site. L'interprétation est compliquée par la diversité des émissivités du terrain. Dans le cas d'une mesure aéroportée, la comparaison avec des photographies aériennes peut s'avérer essentielle.

**Maturité/fiabilité :** La thermographie infrarouge est une technologie tout à fait mature et permet une précision absolue de  $\pm 1^\circ\text{C}$  et relative de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . A ce jour le retour d'expérience en digue est relativement limité, la méthode ayant été davantage exploitée en canaux (ouvrages en permanence en eau) [7]-[9].

**Limites principales :** La végétation introduit des variations d'émissivité et peut aller jusqu'à masquer le rayonnement de la digue. La méthode est donc fortement dégradée si la digue n'est pas correctement entretenue. En outre la détection de fuites au sein d'une digue n'est possible que si cette fuite est suffisamment importante. Enfin les conditions environnementales, et notamment la pluie, altèrent significativement les capacités de détection.

**Indication de coût de mise en œuvre :** Une caméra thermique de poing coûtera de 5 à 10 k€ Un modèle aéroporté pourra avoir un coût plus élevé, auquel la location d'un hélicoptère doit être ajoutée.

## Panneaux électriques

**Mécanisme de rupture surveillé :** Erosion interne.

**Principe :** La tomographie de résistivité électrique est basée sur l'injection d'un courant électrique dans le sol par le biais de deux électrodes enfouies, le potentiel électrique étant mesuré en parallèle par deux autres électrodes [10]. Par inversion du potentiel [11], la résistivité est calculée. Selon l'agencement des électrodes la sensibilité aux variations, le volume ausculté et la profondeur de pénétration seront différents. Les « panneaux électriques » consistent à déployer un grand nombre d'électrodes à l'aplomb de la zone d'étude et à les solliciter tour à tour dans un grand nombre de configurations, permettant d'obtenir une carte complète de résistivité apparente de la digue. Les modifications de faciès, et donc de résistivité, provoquée par une érosion interne d'une digue sont susceptibles d'être alors détectées par un suivi régulier, les électrodes pouvant rester en place.

**Anticipation de la rupture de digue :** Anticipation moyenne : détection possible d'une érosion interne lorsque la digue est en eau, soit essentiellement en crue.

**Rayon d'action/Mobilité :** Jusqu'à plusieurs centaines de mètres linéaires instrumentés, la profondeur maximale investiguée représentant environ 1/8 à 1/6 de la longueur totale. Les électrodes étant enfouies, le dispositif est fixe.

**Collecte/traitement :** La collecte est immédiate. L'inversion des mesures électriques est rapide. L'interprétation est elle très délicate et exige de l'expérience.

**Maturité/fiabilité :** La technologie est à ce jour au stade de R&D, bénéficiant de retours d'expérience encourageant en digues [12]. Les mesures apparaissent comme délicates à interpréter mais facilitées par un suivi continu, donc relatif, qui permet de détecter plus aisément les évolutions.

**Limites principales :** La profondeur investiguée n'est *a priori* pas connue, dépendant de la résistivité même des constituants de la digue. Par ailleurs des faciès de nature et profondeur différentes peuvent présenter des résistivités identiques et seront donc confondus (principe d'équivalence). Ces difficultés peuvent être en partie écartées en réalisant un suivi continu, la comparaison permettant de détecter des évolutions de faciès.

**Indication de coût de mise en œuvre :** Le coût de fourniture d'un dispositif se répartit entre les électrodes (100-200 € par électrode), le résistivimètre (-30-40 k€) le matériel d'acquisition et le logiciel de traitement (<5 k€) Les travaux d'installation sont relativement simples à mettre en œuvre. En cas de suivi périodique, les électrodes, très robustes, peuvent rester en place et le matériel d'acquisition retiré.

## LiDAR très haute résolution

**Mécanismes de rupture surveillés :** Tous mécanismes.

**Principe :** Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un outil de levé topographique. Un signal laser est émis depuis une plate-forme aéroportée ou terrestre vers le sol. Une partie de la lumière est rétrodiffusée vers la source : la distance est mesurée entre la source laser et le premier point rencontré permettant d'obtenir la topographie de la zone survolée et de tous les objets présents dessus mobiles ou non, présents sur les ouvrages (avant filtrage). Le LiDAR aéroporté très haute résolution couplé à son imagerie aérienne contribue à détecter ou diagnostiquer les principaux mécanismes de dégradation ou de rupture des digues, par le repérage et la caractérisation des indices plus ou moins directs qu'ils laissent en surface : mécanismes résultant d'une topographie défavorable de l'ouvrage ou de son environnement, les mécanismes ayant un impact sur la topographie de l'ouvrage ou de son environnement et ceux susceptibles d'être favorisés par des singularités partiellement visibles en surface.

**Anticipation de la rupture de digue :** Bonne anticipation pour tous les mécanismes [13], mais uniquement vis-à-vis d'une crue à venir.

**Rayon d'action/Mobilité :** Ensemble des parties visibles de la digue et de son proche environnement, visée dépendante de la hauteur de vol de l'aéronef. Le dispositif est par nature totalement mobile.

**Collecte/traitement :** La collecte nécessite le déplacement sur site. Le traitement est assez complexe et long (plusieurs semaines) pour aboutir à l'élaboration de modèles numériques de terrain à maillage fin, ce qui peut rendre son utilisation délicate en outil de diagnostic post-crue.

**Maturité/fiabilité :** La technologie est éprouvée aux Pays Bas et aux USA, et se développe en France [13], [14]. La précision du LiDAR hélicoptée est pluricentimétrique ce qui est amplement suffisant pour les applications topographiques classiques, y compris en présence de végétation.

**Limites principales :** La technique ne fournit pas d'information directe sur l'intérieur de la digue, ni sur les parties immergées. L'auscultation topographique est gênée par la végétation (baisse de la précision requise pour un suivi de déplacements). Enfin les indices sont susceptibles d'être effacés en période hors crue tandis que les moyens nécessaires peuvent s'avérer être difficiles à mettre en œuvre rapidement en période de crue ou post-crue.

**Indication de coût de mise en œuvre :** 2 à 2,5 k€/ km, à condition de survoler et traiter 60 à 80 km de digues en une seule opération [15].

## Polarisation spontanée

**Mécanisme de rupture surveillé :** Érosion interne.

**Principe :** La traversée d'un liquide au travers d'un milieu poreux crée des potentiels électriques dits d'électrofiltration. Ces potentiels AP sont de l'ordre de quelques mV à quelques centaines de mV pour les circulations importantes. La polarisation spontanée consiste à mesurer entre deux électrodes fixées dans le sol les potentiels électriques d'électrofiltration. L'existence d'une circulation d'eau se traduit localement, par rapport au potentiel électrique « naturel » du site par un potentiel plus faible à l'amont et plus fort à l'aval. La mesure de l'électrofiltration donne le moyen de détecter les circulations d'eau au sein des digues en terre ou autre granulat. Il s'agit donc de surveiller l'apparition de fuites au sein de la digue, notamment en période de crue.

**Anticipation de la rupture de digue :** Anticipation moyenne : détection possible d'une érosion interne lorsque la digue est en eau, soit essentiellement en crue.

**Rayon d'action/Mobilité :** Le dispositif est fixe. L'importance de l'électrofiltration dépend de la nature de la fuite et des constituants de la digue. Plus la fuite est importante, plus elle pourra être détectée profondément dans la digue. Un linéaire ou un maillage d'électrodes espacées de quelques mètres de distance peut couvrir et détecter des fuites de petite taille (décimétrique, métrique...) lorsque le contraste avec l'encaissant est suffisant.

**Collecte/traitement :** La collecte des données est immédiate. Un traitement du signal classique couplé à une cartographie permet de localiser en XY les anomalies de polarisation spontanée et donc les fuites potentielles. Un traitement plus complexe consiste à inverser des données sur la base des équations simulant le phénomène afin d'évaluer également une profondeur relative. Ce traitement est rendu délicat par le principe d'équivalence [16], [17].

**Maturité/fiabilité :** Cette méthode a prouvé ses capacités de détection des zones d'écoulement préférentiel dans les digues et sur des linéaires relativement importants.

**Limites principales :** L'interprétation de mesures d'électrofiltration est rendue délicate par le principe d'équivalence et par l'absence d'information précise sur la profondeur investiguée. Le suivi continu, et donc en relatif, d'une digue peut néanmoins faciliter la détection d'une fuite. De nombreux potentiels électriques parasites peuvent également dégrader les performances de la méthode.

**Indication de coût de mise en œuvre :** Le coût est similaire à celui des panneaux électriques, soit -50 k€ pour un dispositif d'une centaine d'électrodes.

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DU CHAMP D'APPLICATION DES MÉTHODES ÉTUDIÉES

Méthode	Pertinence de la mesure (hors historique)			Mécanismes surveillés
	Avant crue	En crue	Post-crue	
Surveillance visuelle	Oui	Oui	Oui	Tous
Limnimétrie	Oui	Oui	Oui	Surverse
Fibre optique - température	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
Fibre optique - déformation	Oui	Oui	Oui	Érosion interne, érosion externe
Panneaux électriques	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
Polarisation spontanée	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
Thermométrie infrarouge	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
LiDAR aéroporté haute définition	Oui	Oui	Oui	Tous

## Conclusion

### L'importance de la pratique du « terrain »

Sans tenir compte de l'aspect financier ou de faisabilité technique, de nombreuses méthodes existent pour la surveillance des digues. Pour autant leur emploi n'est certainement pas équivalent, comme le rappelle le Tableau 1. La surveillance visuelle, et dans une moindre mesure la cartographie par LiDAR haute définition, sont les seules méthodes permettant de surveiller et d'anticiper l'ensemble des mécanismes de rupture. En effet les autres méthodes ne se révèlent pertinentes que vis-à-vis d'un ou deux mécanismes donnés. De plus la plupart n'est réellement pertinente que lorsque la digue est en charge, c'est-à-dire en période de crue, ce qui réduit drastiquement leur capacité d'anticipation de la rupture. Enfin un point faible de nombreuses méthodes instrumentales évoquées (panneaux électriques, thermométrie infrarouge, polarisation spontanée, mesure de température par fibre optique) est la difficulté de l'interprétation des mesures, que ce soit pour des raisons de dégradation de la précision des mesures ou de principes d'équivalence par exemple. Pour une majorité seule une confrontation des mesures avec la réalité du terrain permet d'espérer une certitude quant aux évolutions en œuvre sur la digue.

### Complémentarité des approches

Pour autant, la surveillance visuelle et le LiDAR présentent eux-mêmes des limites qui peuvent, ou pourraient, être avantageusement palliées par des méthodes instrumentales complémentaires. La première est la difficulté, voire l'impossibilité, d'étudier l'intérieur de la digue ou les parties immergées, même si de nombreux indices d'évolution se trouvent en surface de digue. A ce titre on peut tout à fait

envisager une instrumentation complémentaire, sur certains tronçons jugés plus à risque par exemple, pour ausculter le corps de la digue et augmenter les chances de détecter une fragilisation de la digue en période de crue.

La période de crue est justement l'une des difficultés que rencontre la surveillance visuelle. En crue les contraintes de temps, amplifiées par une nécessaire gestion rigoureuse de la sécurité des intervenants, peuvent rendre difficile le déploiement d'équipes expérimentées sur de grand tronçons de digue. De la même manière, il ne sera pas forcément aisé de mettre en œuvre des mesures LiDAR aéroportées en un court laps de temps, les hélicoptères pouvant être justement spécialement mobilisés pour d'autres tâches en période de crise. On peut alors tout à fait envisager d'optimiser le travail de surveillance visuelle en pointant du doigt certaines zones suspectées d'être en évolution par une méthode instrumentale. A ce titre la thermométrie infrarouge par caméra de poing, déjà testée avec succès pour la surveillance de canaux, pourrait s'avérer un outil précieux et mérite d'être approfondie dans le cas des digues.

## Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement M. Yves-Laurent Beck (EDF), M. Patrick Chassé (CETMEF), M. Christophe Josserand (INERIS), M. Thibault Mallet (SYMADREM), M. Jean Maurin (DREAL Centre), M. Sergio Palma-Lopes (IFSTARR) et M. Noël Watrin (DREAL Midi-Pyrénées) pour leur aide précieuse à la réalisation de cet état de l'art.

## Références

- [1] Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations : guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Editions 2004.
- [2] Johansson S. (1997). *Seepage monitoring in Embankment Dams*. PhD Rapport, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [3] Fry J.-J. & al., 2004. *Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique*. Colloque Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans, France.
- [4] Védrenne C., Fabre J.-P., Courivaud J.-R., Fry J.-J., 2009. *Détection et quantification des fuites par thermométrie distribuée le long d'une fibre optique*. 23<sup>ème</sup> congrès CIGB, Brasilia, Brazil.
- [5] Meijer & al., 2008. *The development of an early warning system for dike failure*, Waterside security conference, Copenhagen, Denmark
- [6] Artières O., Briançon L., A. Robinet A., 2011. *Auscultation des ouvrages en terres avec un système de détection et d'alerte par fibres optiques*. Compte-rendu de la conférence Rencontres Géosynthétiques 2011, 22-24 Mars 2011, Tours, pp. 197-208.
- [7] Nellis D. (1982). *Application of thermal infrared imagery to canal leakage detection*, Remote sensing of environment, Vol 12, 229-234.
- [8] CFGB, 1997. *Erosion interne : typologie, détection et réparation*. Barrages et réservoirs, n°6, mai 1997, 126p.
- [9] Pickerill J. M. (1998). *Leak detection from rural aqueducts using airborne remote sensing techniques*, International journal of remote sensing, Vol 19, N°12, 2427-2433.
- [10] Fauchard C. & Mériaux P. (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues*, Éditions Quae.
- [11] Loke M. (1996). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method*, Geophysical Prospecting, Vol. 44, p.131-152.
- [12] Palma-Lopes S. (2010). *Surveillance de digues par imagerie de résistivité électrique : expérimentation de longue durée sur une levée de Loire*, Journées scientifiques de géophysique appliquée, congrès AGAP2010, StBrieuc.
- [13] Auriau L., Mériaux P., Lacombe S., Marmu S., Maurin J., Boulay A. (2012). *The airborne high-resolution LiDAR as an efficient tool for topographical survey and detection of surface anomalies on flood protection dike*. FloodRisk 2012 Conference, to be published.
- [14] Royet P., Palma Lopes S., Fauchard C., Mériaux P., Auriau L. (2012). *Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing*. FloodProBE EU Project Report - Task 3.2.
- [15] Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012, à paraître). *L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer*. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry, France.
- [16] Bolève A. (2010). *Suivi d'érosion interne d'une digue expérimentale en terre par monitoring de polarisation spontanée*, Journées Scientifiques de Géophysique appliquée, Congrès AGAP 2010, St Brieuc, France.
- [17] Ishido T. (1999). *Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow*, Journal of Geophysical Research, 104(B7), p. 15,247-215,259.