

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-12-126136-13631C

02/12/2015

**Programme DRA-91 - Maîtrise des risques liés  
aux ouvrages hydrauliques**

**Opération D1 - État des techniques éprouvées et  
innovantes pour la surveillance des digues.**

**Collaboration INERIS-IRSTEA**

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable |*



## **Programme DRA-91 - Maîtrise des risques liés aux ouvrages hydrauliques**

**Opération D1 - État des techniques éprouvées et innovantes pour la surveillance des digues.**

**Collaboration INERIS-IRSTEA**

Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) – BETCGB.

Ce rapport a été rédigé en coopération par l'INERIS et IRSTEA (MM. Paul Royet et Patrice Mériaux). Les spécificités du domaine maritime ont été intégrées avec le soutien du CETMEF (M. Yann Deniaud).

## PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en-dehors de la destination de la prestation.

*Ce rapport a été rédigé en coopération par l'INERIS et IRSTEA (MM. Paul Royet et Patrice Mériaux).*

	Rédaction	Relecture	Vérification	Approbation
NOM	A. CHERKAOUI	C. DUVAL T. BALOUIN	C. FRANCK	P. BIGARRE
Qualité	Ingénieur à l'Unité Risques Naturels, Ouvrages et Stockages à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Ingénieur à l'Unité Identification et Analyse des Risques Accidentels et Ingénieur Chef de Projet - Risques Industriels Direction des Risques Accidentels	Délégué appui aux pouvoirs publics à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Responsable de l'Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique Directeur Délégué de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa				

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
1.1 Mission de la surveillance des digues .....	5
1.2 Problématiques inhérentes à la surveillance des digues .....	5
1.3 Pratiques actuelle de surveillance des digues de protection .....	7
1.4 Démarche de l'Étude De Dangers (EDD) et de la Barrière de Sécurité .....	8
1.5 Objectifs du rapport .....	9
1.6 Ouvrages concernés .....	10
<b>2. DESCRIPTION DES TECHNIQUES DE MESURE .....</b>	<b>11</b>
<b>EXAMEN VISUEL .....</b>	<b>13</b>
<b>LIMNIMÉTRIE .....</b>	<b>13</b>
<b>FIBRE OPTIQUE .....</b>	<b>14</b>
<b>IMAGERIE THERMIQUE .....</b>	<b>14</b>
<b>PANNEAUX ÉLECTRIQUES.....</b>	<b>15</b>
<b>LIDAR TRÈS HAUTE RÉOLUTION .....</b>	<b>15</b>
<b>POLARISATION SPONTANÉE .....</b>	<b>16</b>
<b>3. EVALUATION DE L'APPORT D'UNE SURVEILLANCE INSTRUMENTALE DANS LA DÉMARCHE DE MAÎTRISE DES RISQUES ACCIDENTELS.....</b>	<b>19</b>
3.1 Démarche.....	19
3.2 Analyse .....	25
3.3 Intégration de la surveillance dans l'étude de dangers.....	26
3.4 Cas des digues maritimes .....	27
<b>4. CONCLUSIONS .....</b>	<b>29</b>
4.1 L'importance de la pratique du « terrain » .....	29
4.2 Complémentarité des approches .....	30
4.3 La surveillance, une barrière de sécurité ?.....	31
<b>5. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>33</b>

## Définitions<sup>1</sup>

Afin d'éviter toute ambiguïté vis-à-vis des termes employés dans ce rapport, il convient de définir en amont certaines notions liées à la surveillance des digues :

- **Surveillance** : Ensemble des actions de suivi d'une digue, essentiellement dans le but de s'assurer du maintien de la capacité de la digue à remplir sa mission de protection relative à un niveau de crue donné. D'un *point de vue technique*, la surveillance discutée dans ce rapport se concentrera sur *l'inspection visuelle et sur la surveillance instrumentale* ;
- **Inspection visuelle** ou **examen visuel** : *Examen d'une digue réalisé sur site par un agent de l'organisme gestionnaire* de la digue. Le principe général de cet examen par le gestionnaire 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 affectant l'une ou l'autre de ses composantes : érosion interne/externe, fuite, affaissement, glissement, affouillement, travaux non autorisés, développement de la végétation, etc. Des techniques instrumentales peuvent être exploitées (par exemple, mesure de niveau d'eau en sondage piézométrique). La méthodologie d'inspection visuelle des digues de protection, les données recueillies, ainsi que des modèles de fiche de saisie sont complètement décrits dans le guide *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations* (Mériaux et al, 2004, Editions Quæ] auquel on se référera ;
- **Auscultation** d'un ouvrage : ensemble de mesures ou d'observations quantitatives, répétées dans le temps, avec un traitement/interprétation, de manière à pouvoir en tirer des conclusions sur le comportement de l'ouvrage et/ou de son environnement, et in fine sur sa sécurité. L'auscultation complète les examens visuels réguliers pour permettre au gestionnaire de prendre ses décisions de maintenance ou de déclenchement d'un diagnostic plus approfondi si nécessaire. En cas de diagnostic approfondi, les mesures d'auscultation et leur analyse apportent d'importants éléments à l'expert, en complément d'éventuelles reconnaissances spécifiques et ponctuelles ;
- **Diagnostic** : Recueil de données existantes (bibliographie) et issues d'un examen visuel, de reconnaissances (géotechniques, topographiques, ...) ou d'une auscultation, analyse et conclusions en termes de performances d'une digue et de suites à donner. Le terme n'est pas employé ici en référence à une action réglementaire mais à une démarche technique générale.

---

<sup>1</sup> Ces définitions proposées s'inspirent de celles couramment admises dans la profession des ouvrages hydrauliques (barrages et digues).

<sup>2</sup> Dans le cas d'une digue équipée d'un déversoir, moderne et bien conçue, le niveau de

# **1. INTRODUCTION**

## **1.1 MISSION DE LA SURVEILLANCE DES DIGUES**

Le risque d'inondation est majeur en France. La tempête Xynthia l'a rappelé fin février 2010 en provoquant des ruptures de digues ou des inondations qui ont occasionné un très lourd bilan humain et matériel.

Les digues de protection contre les inondations ont pour objectif d'éviter ou de limiter les conséquences d'une crue ou d'une submersion marine sur des enjeux humains et matériels. Elles doivent être conçues et dimensionnées pour protéger de l'aléa inondation jusqu'au niveau dit « de protection<sup>2</sup> » et, au-delà, rester stable jusqu'au niveau dit « de sûreté<sup>3</sup> ».

La surveillance des digues a pour objectif principal de vérifier que les niveaux de protection et de sûreté sont maintenus sur le long terme. Cela passe notamment par la conservation des caractéristiques initiales comme le niveau de crête ou la résistance de la digue soumise aux sollicitations externes mais aussi par la détection de conditions accidentogènes, susceptibles de provoquer la défaillance de la digue à la prochaine crue.

La deuxième mission de la surveillance se concentre en période de crue ou de crise. En effet, la surveillance de la digue en charge permet de recueillir de l'information sur l'importance de l'évènement en cours (crue, tempête), ainsi que sur la réponse, des digues et de leur environnement proche, à ces sollicitations. Ces informations sont ensuite analysées dans le cadre de retours d'expérience (REX) et relayées aux autorités responsables de la sécurité des personnes et des biens. Si la crue est majeure, les informations issues de surveillance doivent être relayées **en temps réel** à la cellule de crise afin qu'elle puisse prendre les décisions urgentes adéquates (évacuations, affectation de moyens spéciaux, ...).

N.B. : Un postulat de départ de ce rapport est que le dimensionnement initial est adapté aux aléas envisagés (crues, surcotes, houle, etc.). Le cas d'une digue mal dimensionnée au regard d'un aléa ne sera donc pas intégré aux réflexions de ce rapport.

## **1.2 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 principales problématiques (techniques et/ou financières) que l'on peut considérer sont les suivantes :

---

<sup>2</sup> Dans le cas d'une digue équipée d'un déversoir, moderne et bien conçue, le niveau de « protection » est le niveau d'eau au dessus duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture (par inondation lente) suite au début du fonctionnement du déversoir. Pour une digue ancienne ou sans déversoir, le niveau de protection ne peut être défini qu'en parfaite connaissance de la constitution de la digue et de ses performances.

<sup>3</sup> Le niveau de sûreté est le niveau d'eau au dessus duquel la probabilité de rupture de la digue n'est plus considérée comme négligeable (il dépend de la qualité structurelle de la digue). Pour une digue sans déversoir, on peut considérer que « niveau de protection » et « niveau de sûreté » sont confondus.

- les digues sont plus ou moins rarement sollicitées. Par nature, la ligne de crête d'une digue de protection contre les inondations est au-dessus du niveau d'eau habituel afin de pouvoir contenir une éventuelle 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 sollicitations les plus importantes étant aussi les plus rares, cette absence de conditions de crues régulières limite drastiquement le retour d'expérience que l'on peut obtenir sur les techniques de surveillance des digues. Ce point est d'autant plus critique que la technique de surveillance considérée est nouvelle ou ne profite pas d'une validation pertinente dans un autre domaine.

De plus, en période de crue ou de tempête, l'environnement d'une digue et les contraintes qui lui sont exercées évoluent de manière importante et rapide. Dans le cas de certaines techniques instrumentales, le changement brutal de conditions s'avère être une source de difficultés techniques et d'interprétation de mesures ;

- les digues sont des ouvrages à grands linéaires, pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de long pour les plus importantes. Beaucoup de techniques de mesures instrumentales ont un rayon d'action ou de validité limité, ce qui pose des difficultés techniques et surtout financières de mise en œuvre. La capacité d'une technique 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 technique à grand rendement.

Ce linéaire important empêche également de pouvoir profiter pleinement du retour d'expérience de la surveillance des barrages. Ce domaine est très bien documenté mais concerne des ouvrages hydrauliques plus « ponctuels ». Cependant, vis-à-vis de la problématique de « grande longueur », nous pouvons bénéficier du retour d'expérience sur les digues de canaux - bien que relativement récent et encore peu abondant - mais sans omettre qu'à la différence notoire des digues de protection, elles subissent une charge hydraulique permanente ;

- il existe une très grande diversité des maîtres d'ouvrage : 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 protection de plusieurs centaines de kilomètres : 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 9000 km (fluviale et maritime réunis) ;

Pour les 8000 km restant, cette gestion dispersée implique une difficulté de mutualisation des moyens techniques et financiers, compliquant nécessairement la mise en œuvre de stratégies de surveillance à grande échelle. Ceci est d'autant plus critique dans le cas des propriétaires d'un faible linéaire ou tout simplement inconnus. De ce fait, les techniques les plus coûteuses seront difficilement applicables à une proportion importante de digues ;

- enfin, beaucoup de digues françaises sont des ouvrages anciens, parfois séculaires. Cette ancienneté peut créer des complications vis-à-vis d'une stratégie de surveillance à trois points de vue :
  - les ouvrages anciens sont parfois peu ou pas du tout documentés, privant le gestionnaire actuel d'informations importantes sur la structure de la digue (pas de connaissance détaillée de la conception ou des modifications ultérieures) ;
  - 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 impliquant le déploiement d'une fibre au sein de la digue et sur tout son linéaire ;
  - enfin beaucoup d'ouvrages ont été renforcés ou rehaussés au fil des sollicitations qu'ils ont subies. Une grande hétérogénéité de structure et de matériaux constitutifs peut en découler et complexifier significativement la mise en œuvre de certaines techniques ou l'interprétation de leurs résultats.

### 1.3 PRATIQUES ACTUELLE DE SURVEILLANCE DES DIGUES DE PROTECTION

Aujourd'hui, la surveillance des digues est essentiellement assurée par examen visuel périodique, qui est une exigence réglementaire des gestionnaires de digues. L'examen visuel présente l'avantage primordial de permettre une confrontation directe entre l'objet d'étude et le spécialiste. 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*, avec la vision intégratrice de « l'œil humain ». L'approche de terrain est donc incontournable<sup>4</sup>.

Pour autant, l'examen visuel présente certaines limites :

- elle est ponctuelle dans le temps, aucune information n'est disponible entre deux interventions. Ainsi, selon le rythme de l'examen, certaines évolutions brusques peuvent ne pas être détectées durant une période plus ou moins importante (ex : effondrement, travaux non déclarés) ;

---

<sup>4</sup> Si on fait un parallèle avec les barrages, on se souviendra que, même pour les plus grands d'entre eux, en général équipés d'un très grand nombre de capteurs, les tournées de surveillance périodiques du garde-barrage sont considérées comme un élément-clé du système de gestion de la sécurité.

- 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 (caractère subjectif : deux personnes peuvent avoir un avis sensiblement différent sur l'état et la stabilité, surtout si ce sont des personnels moins expérimentés) ;
- son coût de mise en œuvre peut s'avérer non négligeable pour assurer un suivi de routine régulier ;
- elle peut être incomplète du fait que certaines caractéristiques physiques sont délicates à évaluer et ce, même avec l'apport de mesures instrumentales ponctuelles. En particulier, des facteurs de prédisposition à l'érosion interne d'une digue ne peuvent pas être suivis aisément lors d'un examen visuel.

L'auscultation des digues de protection est encore peu pratiquée en France - le déploiement d'un dispositif de mesures instrumentales n'étant pas imposé par la réglementation pour ce type d'ouvrage, à la différence des barrages. Un article<sup>5</sup> a fait le point sur cette question lors d'un récent colloque technique du CFBR. Nous y renvoyons le lecteur.

#### **1.4 DÉMARCHE DE L'ÉTUDE DE DANGERS (EDD) ET DE LA BARRIÈRE DE SÉCURITÉ**

Dans le cadre de la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques introduite par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 et modifiée par le décret 2015-526 du 12 mai 2015, une étude de dangers (EDD) est demandée pour les digues - de protection contre les inondations de classe A, B ou C<sup>6</sup>. L'article L211-3 du code de l'environnement précise que l'étude de dangers « expose les risques que présente l'ouvrage pour la sécurité publique, directement ou indirectement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage. Cette étude prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents. »

L'étude de dangers permet donc de statuer de manière synthétique, méthodique et idéalement exhaustive sur les risques associés à une situation accidentelle. Son objectif est in fine de permettre une meilleure gestion de ces risques, notamment grâce à des mesures de réduction des risques mises en place par le gestionnaire de la digue.

---

<sup>5</sup> MERIAUX P., MONIER T., TOURMENT R., MALLETT T., PALMA LOPES S., MAURIN J., PINHAS M. - 2012. 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 », Chambéry (FRA), 27-28 novembre 2012.

<sup>6</sup> La classe d'un système d'endiguement est définie par la population protégée par le système d'endiguement : Classe A (population supérieure à 30 000 personnes), Classe B (population inférieure ou égale à 30 000 personnes et supérieure à 3 000 personnes) et Classe C (population inférieure ou égale à 3000 et supérieure ou égale à 30). Pour plus de renseignement, consulter le décret 2015-526 du 12 mai 2015.

L'étude de dangers est un outil réglementaire qui trouve ses origines dans le domaine des installations classées, depuis 1976 selon un format déterministe et depuis 2003 selon un format probabiliste. Dans le domaine des installations classées, les dispositifs techniques et organisationnels mis en place pour réduire les risques sont désignés par le terme de barrière de sécurité et font l'objet d'un traitement spécifique dans les études de dangers.

## **1.5 OBJECTIFS DU RAPPORT**

L'objectif du présent rapport est de faire l'état des différentes techniques de mesure existantes à ce jour, éprouvées ou au stade de recherche et développement, pour la surveillance des digues (c'est-à-dire les techniques permettant la caractérisation des paramètres traduisant la capacité d'une digue à remplir sa mission de protection vis-à-vis d'un niveau d'eau donné). Pour chaque technique décrite, y compris l'examen visuel, les avantages et les limites ont été évalués en regard du ou des mécanismes de rupture surveillés.

Compte-tenu des limites de l'examen visuel évoquées ci-dessus, il s'agit également d'évaluer comment les techniques instrumentales peuvent apporter une aide complémentaire pertinente.

Il existe de nombreuses techniques de mesure permettant de suivre les caractéristiques d'une digue. Le choix des techniques à décrire a été basé sur différents critères : fiabilité, pertinence hors et en sollicitation, grand rendement, possibilité de télésurveillance, etc.

Le chapitre 2 indique les techniques instrumentales retenues et présente les informations récoltées. Des fiches détaillées par technique sont renvoyées en annexe, tandis qu'un tableau synthétique accompagné est donné dans le corps du rapport.

D'autre part, afin de permettre une réflexion la plus globale possible sur l'apport de l'examen visuel et des techniques instrumentales dans le cadre de la maîtrise des risques accidentels, le chapitre 3 développe une analyse de risques générique basée sur les principaux mécanismes provoquant ou favorisant la rupture d'une digue de protection.

Ces réflexions visent à offrir une vision la plus exhaustive possible des facteurs déclenchant ou aggravant pour un mécanisme donné, des réponses et des lacunes de l'examen visuel en regard de ces facteurs et des apports des techniques instrumentales présentées dans le chapitre 2. Au-delà du strict apport « pratique » des techniques instrumentales, la question de leur intégration au sein d'une étude de dangers, en tant que barrières de sécurité ou non, est posée. La démarche est détaillée en début de chapitre.

## 1.6 OUVRAGES CONCERNÉS

Ce rapport concerne les digues de protection contre les submersions fluviales et maritimes. Le rapport a été rédigé en premier lieu pour le cas des digues fluviales : au sein des fiches descriptives de chaque technique décrite, les éventuelles spécificités liées au contexte marin sont précisées en fin de fiche. L'approche EDD est également complétée par une description succincte des spécificités à prendre en compte pour les digues maritimes. Néanmoins, une approche aussi complète que pour le domaine fluvial n'a pas été de nouveau déroulée.

Les digues de canaux ne sont pas concernées. Les digues de protection contre les inondations sont dites à charge variable puisque le niveau d'eau est habituellement bien inférieur à la crête de l'ouvrage et que ce n'est qu'en période de crue que l'ouvrage est réellement soumis aux effets de l'eau. Au contraire, les digues de canaux sont, elles, en charge quasi permanente. Cette différence de sollicitation hydraulique est fondamentale à la fois pour la conception de ces ouvrages mais également des points de vue du diagnostic ou de la surveillance. Cependant, compte tenu du point commun du grand linéaire des ouvrages, le retour d'expérience de la surveillance des digues de canaux pourra être exploité pour la surveillance des digues de protection à charge variable, notamment en période de crue.

## **2. DESCRIPTION DES TECHNIQUES DE MESURE**

Cette section présente en détail les techniques de mesure étudiées. Pour chacune, plusieurs aspects sont décrits selon le schéma ci-après, exception faite de l'examen visuel. Ces catégories ne sont pas hermétiques, certains aspects pouvant parfois recouvrir plusieurs d'entre elles.

- Le principe de fonctionnement de la technique de mesure est décrit, en explicitant les caractéristiques physiques mesurées. La compréhension du fonctionnement est essentielle pour cerner les possibilités et les limites de la technique.
- Le mécanisme de rupture surveillé est indiqué, en précisant comment l'évolution des caractéristiques physiques mesurées témoigne de l'avancée de ce mécanisme.
- Le rayon d'action correspond à l'étendue spatiale effective de la mesure ou de sa représentativité. Dans la pratique, on distinguera les techniques ponctuelles fixes des techniques à grand rendement (mesure étendue ou mesure ponctuelle mais mobile). Compte tenu de la géométrie linéaire étendue d'une digue, la capacité d'une technique à réaliser une surveillance à grande échelle en un délai acceptable est une caractéristique essentielle.
- La manière dont sont collectées les données est décrite. Il s'agit de déterminer si la technique implique une intervention humaine ou si les mesures peuvent être réalisées automatiquement, offrant la possibilité d'une télésurveillance. En effet, une télésurveillance des digues peut être précieuse en période de crue ou de surcote si l'accès à la digue est rendu difficile ou dangereux. Cela suppose naturellement que le dispositif de télésurveillance en place est correctement entretenu et qu'il n'a pas été détérioré par la crue.
- Selon que le traitement de la mesure brute et son interprétation seront simples ou au contraire longs et complexes, la technique pourra être efficacement employée ou non en période de crue. Le niveau de technicité requis pour la collecte, le traitement et l'interprétation des mesures est également résumé dans cette rubrique, selon l'échelle suivante : « Faible compétence », « Technicien », « Ingénieur », « Expert ».
- La maturité de la technologie est évoquée. Certaines techniques sont bien connues et maîtrisées, parfois issues de domaines totalement étrangers à celui des digues. D'autres techniques de mesure, *a priori* prometteuses, sont à ce jour au stade de recherche et développement, bénéficiant encore de peu de retours d'expérience quant à la surveillance des digues.
- La fiabilité de la mesure traduit sa capacité à détecter une évolution : pas d'alerte ratée, pas de fausse alerte. Le rôle d'une surveillance instrumentale pouvant être d'optimiser l'examen visuel, une fiabilité absolue, bien qu'évidemment souhaitable, n'est pas une condition *sine qua none* pour que la technique soit pertinente à mettre en œuvre.
- Les moyens techniques de mise en œuvre nécessaires sont décrits succinctement.

- L'investissement financier est également abordé puisque pour être mise en œuvre, la technique doit présenter un ratio coût/bénéfice satisfaisant.
- Enfin, des références de bibliographie technique, de projets de recherche ou de retours d'expérience sont données.

Les techniques décrites sont les suivantes :

- Examen visuel ;
- Limnimétrie (mesure du niveau d'eau) par sonde de pression puis par radar ;
- Mesure de température et/ou de déformation par fibre optique ;
- Imagerie thermique (ou imagerie infrarouge) ;
- Tomographie de résistivité électrique par panneaux électriques ;
- LiDAR (Light Detection And Ranging) très haute résolution ;
- Polarisation spontanée.

Une version résumée des fiches est donnée ci-après, ainsi qu'un tableau de synthèse. Les fiches complètes, comprenant également les références pour chaque technique, sont placées en annexes de ce rapport.

Plusieurs techniques de reconnaissance des digues, permettant pourtant d'évaluer certains paramètres essentiels d'une digue, ne sont pas décrites ici. Il s'agit notamment des techniques d'investigation géotechniques (pénétrométrie, essais de perméabilité, essais de cisaillement, etc.), étant limitées à des mesures ponctuelles dans le temps et exigeant une intervention sur site, ne peuvent donc pas être aisément intégrées à une procédure de surveillance et encore moins à une télésurveillance. Elles s'avèrent néanmoins très intéressantes et utiles pour contribuer au diagnostic et pour définir le dispositif d'auscultation le mieux approprié à l'ouvrage et la localisation des instruments à installer.

Deux techniques géophysiques sont décrites dans ce rapport (tomographie de résistivité électrique et polarisation spontanée). Il existe d'autres techniques de reconnaissance (radar, magnéto-tellurique, sismique réfraction, etc.) dont les capacités à caractériser une digue sont tout à fait comparables à celles des techniques retenues. Pour autant, une diversité des familles de techniques de mesures a été privilégiée. Au sein de la famille des techniques géophysiques, le choix a été fait de retenir deux techniques pouvant être déployées de manière permanente ou dotée d'un premier retour d'expérience dans ce cadre.

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

**Principe** : Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue se révèlent par des indices de surface : mouvements de terrain, érosions, ravinements, végétation singulière, terriers, etc. L'examen visuel 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). L'examen visuel 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** : L'examen visuel est évidemment mobile. Il 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. Environ la moitié du temps sur le terrain est nécessaire après que l'événement ait eu lieu pour mettre en forme et traiter les données acquises.

**Maturité/fiabilité** : L'examen visuel bénéficie d'un très grand retour d'expérience et est tout à fait mature.

**Utilisation en période de crise** : En période de crue, trois principaux paramètres entrent en ligne de compte : l'accès à la digue (selon la saison et les conditions climatiques), le temps (rapidité de l'examen visuel dépendant du linéaire considéré et le transfert des observations récoltées), la sécurité des opérateurs (l'ampleur de la crue peut rendre l'inspection dangereuse). En période post-crue, l'examen visuel est tout à fait adapté. Dans le cas de risque de crues successives et rapprochées, cette inspection devra se faire dans un délai réduit.

**Limites principales** : Une solide 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. En outre, la surveillance en crue de nuit (les conditions peuvent l'imposer) est forcément moins efficace et plus délicate sur le plan de la sécurité. La grande longueur des ouvrages et l'intervention en conditions acceptables de sécurité des opérateurs exigent de plus une organisation et une préparation soignées des interventions.

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

**Maritime** : L'examen visuel est à la base de la surveillance des digues littorales comme fluviales. Un accent particulier est mis sur l'observation de la topographie environnante qui influence fortement la houle. Les franchissements de vagues impliquent également une attention particulière à l'état de la digue côté val.

**Mécanisme de rupture surveillé** : Tous mécanismes et en particulier la surverse.

**Principe** : En particulier pour la gestion du risque de surverse, la connaissance du niveau d'eau est une information évidemment essentielle en cas de crue. 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 vitesses 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, il est nécessaire de connaître parfaitement la corrélation entre le niveau d'eau au fleuve/en mer et le niveau d'eau à la digue. .

**Anticipation de la rupture de digue** : L'anticipation de la surverse est fonction du rythme de montée des eaux et de la fonctionnalité du capteur lors de la crue.

**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.

**Utilisation en période de crise** : Si l'instrumentation reste en place et fait partie d'un système de télésurveillance, la surveillance limnimétrique sera très utile en période de crue pour anticiper en temps réel l'atteinte de seuils stratégiques (niveau de protection et de sûreté). En période post-crue, l'analyse des mesures enregistrées permettra un bon retour d'expérience et dans certains cas, un ajustement de la relation niveau d'eau au fleuve/en mer et niveau d'eau à la digue.

**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 centimètres immédiats : si le niveau de crue atteint cette zone, la mesure se dégrade fortement. La précision diminue avec la distance capteur/surface. L'association du capteur radar (niveau normal et haut) et de la 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 moins coûteuses peuvent être utilisées (quelques k€, voire moins pour une mesure sans télétransmission).

**Maritime** : Inadapté à la mesure du niveau de la mer, à cause de la houle notamment. De plus les franchissements ne sont pas pris en compte. Au-delà des mesures éprouvées par houlomètre notamment, la surveillance vidéo semble une technique pertinente et prometteuse.

## Fibre optique

## Imagerie thermique

**Mécanismes de rupture surveillés :** Erosion interne, glissements (de talus, affaissement, 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 et de la déformation est donc obtenue tout au long de la fibre optique étant à la fois capteur et vecteur du signal de mesure. Contrairement aux instruments utilisés classiquement, son utilisation permet d'avoir une vue globale et détaillée de la zone instrumentée.

**Anticipation de la rupture de digue :** La rupture a été anticipée de 2 jours (température et déformation) au cours de l'expérimentation IJkdijk aux Pays-Bas en 2009-2010. Ce projet de R&D a fourni des résultats prometteurs et a montré l'efficacité technique du dispositif. Sa mise en œuvre sur ouvrage réel paraît envisageable, moyennant des adaptations. Les contraintes de coût nécessiteront toutefois de cibler les tronçons d'ouvrage à équiper, en fonction de leur pathologie avérée ou potentielle.

**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 en méthode passive (moins en méthode active).

**Collecte/traitement :** Collecte immédiate des données, transmission automatique possible. L'interprétation du signal en déformation est relativement simple 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 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 deviennent nécessaires.

**Maturité/fiabilité :** La technique peut être considérée comme mature et fiable. Des précisions de 0,1°C en température et de 0,01% en déformation peuvent être obtenues.

**Utilisation en période de crise :** L'analyse des données relativement rapide en méthode active pourra être utilisée en période de crue. La méthode passive n'est pas appropriée. En période post-crue, l'analyse des mesures enregistrées permettra un bon retour d'expérience.

**Limites principales :** Le coût et la technicité de la mesure sont les principales limites de la surveillance par fibre optique, en particulier pour la méthode active de mesure de la température. 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 hors coût d'exploitation.

**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 portée au poing. Un dispositif aéroporté offre un rendement maximal. Prise au poing, la caméra peut faciliter l'examen visuel et attirer l'attention de l'opérateur sur des zones où un phénomène d'écoulement anormal n'a pas encore été détecté à l'œil nu.

**Collecte/traitement :** Nécessité d'un déplacement sur site. L'interprétation est compliquée par la diversité des émissivités du terrain. Pour une mesure aéroportée, des photographies aériennes peuvent s'avérer essentielles.

**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  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Le retour d'expérience en digue est relativement limité, la technique ayant été davantage exploitée en canaux (ouvrages en permanence en eau) ou à titre expérimental (DREAL Centre).

**Utilisation en période de crise :** Cette méthode exige une présence sur le terrain en période de crue, dans le cas d'un examen visuel assisté par caméra thermique. Cependant, cette méthode devient difficile à mettre en place dans le cas de mesures aéroportées (conditions climatiques souvent difficiles). Si la surveillance en période de crue peut s'avérer délicate, le diagnostic post-crue de la digue demeure un cas d'application particulièrement intéressant.

**Limites principales :** La végétation introduit des variations d'émissivité et peut aller jusqu'à masquer le rayonnement de la digue. La technique 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 les eaux de pluie, de ruissellement et de franchissement, altèrent significativement les capacités de détection en uniformisant la température de surface des parements de la digue (optimales lors des périodes de fort contraste thermique).

**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.

**Maritime :** L'imagerie thermique présente essentiellement un intérêt lorsque la digue est sollicitée. De plus il semble donc tout à fait exclu de pouvoir différencier les anomalies thermiques provoquées par une présence anormale d'eau au sein de la digue et celles par la simple présence d'eau en surface du fait de la houle et des franchissements de vague.

**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 est mesuré en parallèle par deux autres électrodes. Par inversion du potentiel, 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 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. En reconnaissance, la méthode permet de détecter des hétérogénéités dans le remblai (ex : couches ou zones perméables, conduits métalliques, ...), sources potentielles d'érosion interne. En suivi régulier, les modifications de teneur en eau (du fait des fuites et écoulements internes) ou de faciès (évolution de la granulométrie), et donc de résistivité, en lien avec une érosion interne potentielle ou avérée d'une digue sont susceptibles d'être alors détectées par un suivi régulier, les électrodes pouvant rester en place. Ainsi lors d'une crue, la saturation du remblai modifie les contrastes de résistivité dans l'environnement des zones d'écoulements internes.

**Anticipation de la rupture de digue :** Anticipation moyenne : détection d'hétérogénéités internes en reconnaissance (dispositif mobile), détection possible d'une érosion interne lorsque la digue est en eau, soit en crue.

**Rayon d'action/Mobilité :** Jusqu'à plusieurs centaines de mètres linéaires instrumentés, la profondeur maximale investiguée représente 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 en continu est à ce jour au stade de R&D, bénéficiant de retours d'expérience encourageant en digues. Les mesures apparaissent comme délicates à interpréter mais facilitées par un suivi continu qui permet de détecter plus aisément les évolutions.

**Utilisation en période de crise :** Avec une télésurveillance, la méthode est efficace en période de crue si l'interprétation des données est réalisée rapidement. En période post-crue, elle produit un retour d'expérience sur l'évènement passé.

**Limites principales :** La profondeur réellement investiguée n'est pas connue, dépendant de la résistivité des constituants de la digue. Des faciès de nature et profondeur différentes peuvent présenter des résistivités identiques et seront 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 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. En cas de suivi périodique, les électrodes, très robustes, peuvent rester en place.

**Maritime :** La technique peut tout à fait s'appliquer dans un contexte côtier. La mesure de résistivité est influencée par la présence d'eau mais également par sa salinité, l'interprétation doit donc en tenir compte si la mesure se fait en période de charge de la digue. En période de charge le milieu très conducteur imposera également de forts courants d'injection (de l'ordre de l'Ampère).

**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, mobiles ou non, présents sur les ouvrages (avant filtrage). Le LiDAR hélicopté 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 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, 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, largeur de fauchée 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 (aéronef et antennes GPS au sol). Le traitement est assez complexe et plus ou moins long 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. La précision du LiDAR hélicopté est pluri-centimétrique. Ce qui est amplement suffisant pour les applications topographiques classiques, y compris en présence de végétation.

**Utilisation en période de crise :** L'utilisation de cette technique en période de crue apparaît difficile. En effet, les contraintes liées à l'utilisation d'un hélicoptère (réclamant des conditions atmosphériques pas trop défavorables) et les délais de préparation du vol et d'interprétation des résultats semblent peu compatibles avec la surveillance des digues et de leur environnement proche (de plus noyé côté cours d'eau) en période de crue. Cependant, compte tenu de son grand rendement in situ, elle est envisageable dans un processus de diagnostic post-crue visant à repérer et quantifier les éventuels mouvements topographiques dus à la crue ou à la décrue (tassements, glissements, ...), à inventorier les désordres de surface et à définir les réparations urgentes.

**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, certains 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.

**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.

## 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  $\Delta P$  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. Par rapport au potentiel électrique « naturel » du site, l'existence d'une circulation d'eau se traduit localement 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. Il s'agit 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. Afin d'évaluer également une profondeur relative, un traitement plus complexe consiste à inverser des données sur la base des équations simulant le phénomène. Ce traitement est rendu délicat par le principe d'équivalence.

**Maturité/fiabilité :** Cette technique a prouvé ses capacités de détection des zones d'écoulement préférentiel dans les digues à charge permanente et sur des linéaires importants. L'exploitation sous forme d'une surveillance permanente est délicate du fait de la dérive de la mesure dans le temps et du peu d'anticipation, la mise en charge de la digue étant nécessaire pour provoquer un écoulement.

**Utilisation en période de crise :** Avec une télésurveillance, la méthode peut être utilisée en période de crue si l'interprétation des données est réalisée rapidement.

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

**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.

**Maritime :** La salinité de l'eau en contexte maritime peut apporter une difficulté supplémentaire : dans le cas de digue à noyau d'argile le contraste avec l'eau salée, bon conducteur, sera d'autant plus faible. L'exploitation d'un dispositif de surveillance permanent est donc au moins aussi délicate en contexte maritime que fluvial, si ce n'est davantage.

Technique	Surveillance visuelle	Limnimétrie (sonde de pression)	Limnimétrie (radar)	Fibre optique (température)	Fibre optique (déformation)	Panneaux électriques	Polarisation spontanée	Thermométrie par caméra infrarouge	Lidar
Paramètres physiques mesurés	Singularités, désordres ou indices visuels de surface	Pression d'eau	Hauteur d'eau	Température	Déformation	Résistivité électrique	Potentiel électrique	Température	Distance au sol et coordonnées X,Y,Z. Imagerie et couleurs.
Surv. <u>Surverse (SV)</u>	Oui	Oui	Oui	Non	Non	-	-	-	Oui
Surv. <u>érosion interne (EI)</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Surv. <u>érosion externe (EE)</u>	Oui	Oui	Oui	Non	Oui (par rupture des fibres)	-	-	-	Oui
Surv. <u>glissement de talus (GT)</u>	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	-	-	-	Oui
Anticipation de la rupture de digue (mécanisme : délai)	Bonne anticipation de tous les mécanismes mais uniquement vis-à-vis d'une crue à venir. Pour la surveillance en crue, délai d'anticipation variable selon le mécanisme : faible pour la surverse, moyen à bon pour les autres	Anticipe la surverse : selon rythme de montée des eaux.	Anticipe la surverse : selon rythme de montée des eaux.	Oui : 2 jours dans l'expérimentation Ijkdijk. Mais les conditions de cette expérimentation ne sont pas forcément généralisables	Oui : 2 jours dans l'expérimentation Ijkdijk. Mais les conditions de cette expérimentation ne sont pas forcément généralisables	Détection d'une érosion interne, éventuellement hors crue mais essentiellement en crue : anticipation moyenne.	Détection de fuites dues à l'érosion interne, visibles uniquement en crue : peu d'anticipation.	Détection d'une érosion interne, éventuellement hors crue mais essentiellement en crue : anticipation moyenne.	Bonne anticipation de tous les mécanismes mais uniquement vis-à-vis d'une crue à venir.
Rayon d'action typique	Ensemble des parties visibles de la digue et de son proche environnement	Mesure locale, représentativité dépend de la géomorphologie.	Mesure locale, représentativité dépend de la géomorphologie.	Mesure distribuée tout le long de la fibre ; Rayon de détection de fuite de quelques décimètres autour de la fibre	Mesure distribuée tout le long de la fibre	Selon taille du dispositif : plusieurs centaines de mètres possibles.	Selon taille du dispositif : plusieurs centaines de mètres possibles.	Mesure strictement locale.	Ensemble des parties visibles de la digue et de son proche environnement. Dépend de la hauteur du vol de l'aéronef.
Dispositif de mesure en place / mobile	Mobile (opérateur pédestre)	En place. Travaux de génie civil à prévoir pour la protection de la sonde.	En place. Capteur installé au-dessus de l'eau : nécessité d'un ouvrage d'art ou d'un support.	En place (en tranché)	En place (en tranché)	En place. Mise en terre des électrodes.	En place. Mise en terre des électrodes.	Mobile. La caméra thermique peut être soit aéroportée, soit au poing.	Mobile (dispositif hélicopté)
Collecte (Délais/Moyens)	Rendement in situ de 1 à 5 km/jour (2 ou 3 opérateurs). Données disponibles en temps différé (sauf surveillance en crue avec liaison radio ou téléphonique vers un PC de crise)	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Collecte immédiate des données, transmission automatique possible.	Données disponibles en temps réel.	Rendement d'acquisition élevé (jusqu'à 80 km/jour). Données traitées disponibles en temps différé
Traitement (Délais/Moyens)	Temps de traitement (mise au propre et/ou saisie informatique des informations) d'au moins la moitié du temps de parcours de surveillance in situ.	Aucun traitement.	Aucun traitement.	Traitement complexe	Traitement relativement simple	Inversion des mesures électriques rapide. Interprétation délicate, exigeant de l'expérience.	Traitement rapide (détection immédiate). Interprétation parfois délicate demandant de l'expérience.	Aucun traitement.	Traitement assez lourds (plusieurs semaines) pour aboutir à l'élaboration de modèle numérique de terrain (MNT et MNEs) à maillage fin
Maturité de la technologie / Fiabilité	Pratique mature	Technologie mature. Bonne précision : ± 5 à 10 mm	Technologie mature. Excellente précision : ± 5 mm. Pas d'influence de la température. Capteur sans contact.	Technologie mature pour la mesure de température. La difficulté est de passer de la température à la détection/quantification des fuites	Technologie mature	Technologie au stade R&D, bénéficiant de retours d'expérience encourageant. Mesure délicate à interpréter, facilité par un suivi continu.	Technologie relativement mature. La détection des fuites est fiable mais l'interprétation reste parfois difficile.	Technologie largement éprouvée, Excellente précision des mesures < ±1°C.	Technologie éprouvée aux Pays-Bas et aux USA, se développant en France
Utilisation en période de crise	Plus ou moins réalisable en tenant compte de l'accès à la digue, le temps (rapidité de l'inspection visuelle), la sécurité des opérateurs. En période post-crue, l'inspection visuelle est tout à fait adaptée.	Si l'instrumentation reste en place et fait partie d'un système de télésurveillance, la surveillance sera très utile en période de crue pour anticiper en temps réel l'atteinte de seuils stratégiques (niveau de protection et de sûreté). En période post-crue, l'analyse des mesures enregistrées permettra un bon retour d'expérience et dans certains cas, un ajustement de la relation niveau d'eau en fleuve/mer et niveau d'eau à la digue.		L'analyse des données relativement rapide en méthode active pourra être utilisée en période de crue. La méthode passive n'est pas appropriée. En période post-crue, l'analyse des mesures enregistrées permettra un bon retour d'expérience.		Avec une télésurveillance, la méthode est efficace en période de crue si l'interprétation des données est réalisée rapidement. En période post-crue, elle produit un retour d'expérience sur l'évènement passé.	Avec une télésurveillance, la méthode peut être utilisée en période de crue si l'interprétation des données est réalisée rapidement.	Cette méthode exige une présence sur le terrain en période de crue, dans le cas d'un examen visuel assisté par caméra thermique. Cependant, cette méthode devient difficile à mettre en place dans le cas de mesures aéroportées (conditions climatiques difficiles). Si la surveillance en période de crue peut s'avérer délicate, le diagnostic post-crue de la digue demeure un cas d'application particulièrement intéressant.	Les contraintes liées à l'utilisation d'un hélicoptère (réclamant des conditions atmosphériques pas trop défavorables) et les délais de préparation du vol et d'interprétation des résultats semblent peu compatibles avec la surveillance des digues et de leur environnement proche (de plus noyé côté cours d'eau) en période de crue. Cependant, compte tenu de son grand rendement in situ, elle est envisageable dans un processus de diagnostic post-crue visant à repérer et quantifier les éventuels mouvements topographiques dus à la crue ou à la décrue (tassements, glissements, ...), à inventorier les désordres de surface et à définir les réparations urgentes.
Limites principales	Expérience et compétence nécessaire pour les opérateurs. Pas d'information directe sur l'intérieur de la digue, ni sur les parties immergées. Gêne occasionnée par la végétation. Surveillance "à sec" : indices susceptibles d'être effacés. Surveillance de nuit moins efficace.	Dérive de la mesure dans le temps : recalage nécessaire tous les mois. Maintenance périodique du capteur (capteur consommable). Capteur immergé : vulnérable aux crues.	Capteur placé au-dessus de l'eau. Besoin d'un cône libre. Zone morte à proximité du capteur.	Coût et technicité, difficultés pour l'interprétation des mesures	Coût et technicité	Principe d'équivalence. Interprétation délicate des mesures.	Principe d'équivalence. Signaux parasites.	Influence de l'environnement (végétation). Gradient thermique variant avec la date et l'horaire de mesure.	Pas d'information directe sur l'intérieur de la digue, ni sur les parties immergées. Gêne occasionnée par la végétation en auscultation topographique (baisse de la précision requise pour un suivi de déplacements). Vol "à sec" : indices susceptibles d'être effacés.
Indication de coût de mise en œuvre	250 à 1000 €/km selon l'état d'entretien et/ou de la dégradation de la digue	Peu cher : qqes dizaines d'euros pour une sonde.	1000 à 2000 € pour un capteur	Quelques dizaines de k€/km	Quelques dizaines de k€/km	~50 k€ pour un dispositif de 100 électrodes + chaîne d'acquisition.	~50 k€ pour un dispositif de 100 électrodes + chaîne d'acquisition.	5 à 10 k€ pour une caméra de poing.	2000 à 2500 €/km, à condition de survoler et de traiter 60 à 80 km de digues en une seule opération.



### **3. EVALUATION DE L'APPORT D'UNE SURVEILLANCE INSTRUMENTALE DANS LA DÉMARCHE DE MAÎTRISE DES RISQUES ACCIDENTELS**

#### **3.1 DÉMARCHE**

L'essentiel de la surveillance des digues s'effectue aujourd'hui par examen visuel qui est à la fois une exigence réglementaire et une technique incontournable de détection des désordres pouvant mener à la rupture. Les techniques instrumentales sont relativement peu employées. Dans cette section, nous allons évaluer dans quelle mesure les techniques instrumentales pourraient venir compléter l'examen visuel pour constituer de véritables barrières de sécurité au sens des analyses de risques conduites dans les études de dangers (EDD) des digues. Il n'est pas suggéré un remplacement de l'examen visuel par des techniques instrumentales mais l'apport des données complémentaires pour soit permettre une meilleure compréhension des phénomènes en évolution soit une détection plus précoce (meilleure réactivité).

Dans cette optique, nous avons déroulé la démarche suivante :

- pour les trois principaux mécanismes de défaillance (surverse, érosion interne et instabilité)<sup>7</sup>, les événements initiateurs ont été listés de manière générique. Deux niveaux d'événements initiateurs (EI) sont utilisés, les événements de niveau N2 étant une sous-catégorie des événements de niveau N1. Par exemple, concernant la problématique de l'érosion interne due à la présence d'un conduit macroscopique au sein de la digue, nous distinguons les objets naturels (terriers), dont l'extension est difficile à connaître, des objets anthropiques (conduites) qui sont *a priori* connus. Tous les événements initiateurs décrits ne mènent pas nécessairement à la rupture (facteurs déclenchants) mais sont, au mieux, défavorables (facteurs aggravants). Ils peuvent mettre en péril la stabilité de la digue et méritent à ce titre d'être inclus dans cette étude. Une caractérisation au premier ordre de la fréquence de l'événement initiateur est proposée, la notion d'aléa tenant compte à la fois de la gravité et de la probabilité ;
- pour chaque événement initiateur identifié, les actions de remédiation possibles et leur délai approximatif de mise en œuvre sont évoqués. Cet aspect est primordial dans une logique de maîtrise du risque à la source où l'objectif est d'empêcher la rupture de la digue. Le délai de mise en œuvre d'une solution vis-à-vis d'un événement initiateur donné conditionne en effet en partie le délai sous lequel ledit événement doit être identifié (plus la mesure corrective est longue à mettre en place, plus il est important de détecter la défaillance tôt). L'objectif est d'intégrer les techniques de mesure dans une chaîne complète de type détection-traitement-action, classiquement envisagée pour décrire les barrières de sécurité complexes dans le domaine industriel ;

---

<sup>7</sup> Le mécanisme d'érosion externe n'a pas été étudié ici même s'il peut se rencontrer. En effet, une brèche totale par le seul mécanisme d'érosion externe au cours d'une seule crue est possible et a déjà été observée (brèche de la digue de Guillaumes au bord du Var, en novembre 1994). Ce point pourra faire l'objet d'un travail futur.

- l'efficacité de l'examen visuel est d'abord évaluée par la capacité à détecter effectivement un événement initiateur de défaillance lors d'une visite de terrain. Cette considération est ensuite complétée par une appréciation plus globale de la performance de l'examen visuel dans un scénario d'accident en tenant compte du caractère discontinu des visites de terrain (typiquement annuelles ou en périodes pré/en/post crue) et du délai de mise en œuvre des actions de remédiation ;
- une sélection des techniques instrumentales susceptibles de contribuer à la détection de l'événement initiateur est réalisée.

Quatre cas de figure sont alors mis en évidence (code couleur) (Figure 1) :

- Les scénarios 1 où l'examen visuel est pleinement adapté et il n'est pas nécessaire de bénéficier d'une aide instrumentale supplémentaire ;
- Les scénarios 2 où l'examen visuel est adapté mais peut être complété de manière pertinente par une surveillance instrumentale ;
- Les scénarios 3 où l'examen visuel n'est pas totalement adapté à la réduction du risque considéré et où une technique instrumentale peut apporter une information pertinente ;
- Les scénarios 4 où ni l'examen visuel ni la surveillance instrumentale ne peuvent aider de manière satisfaisante à la réduction du risque de défaillance de la digue.

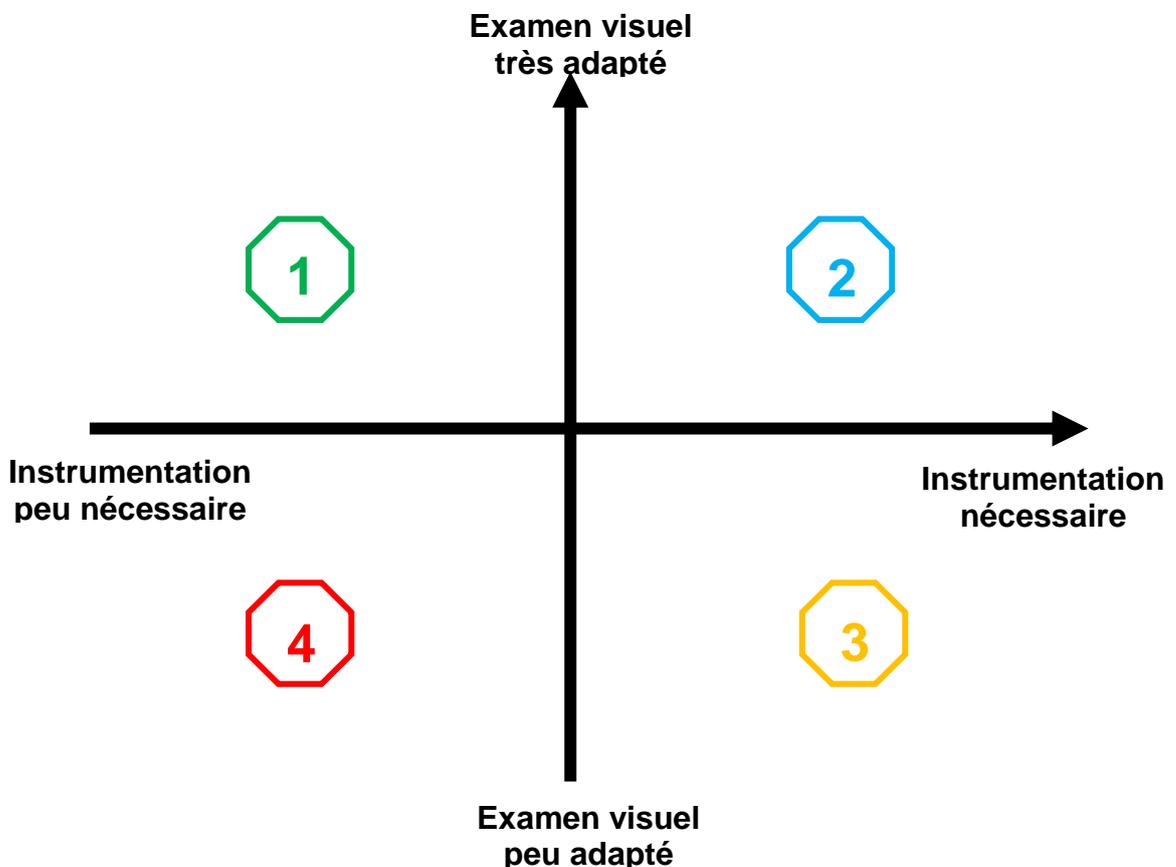


Figure 1 : Représentation schématique des différents scénarios

Événement initiateur (EI)				Actions de remédiation (AR) envisageables en cas de détection de l'EI		Performance de la surveillance visuelle (SV) par rapport à l'événement initiateur		Apports d'une surveillance instrumentale
Événement initiateur (N1)	Événement initiateur (N2)	Remarques	Fréquence	Actions de remédiation	Délai de mise en œuvre	Efficacité de détection des causes lors d'une SV	Performance de la SV au type d'EI et aux AR envisageables	
Affaissement étendu de la crête	Compressibilité de la fondation	Phénomène lent (compressibilité), plus ou moins rapide dans les autres cas	Rare	Remise à niveau en urgence de la crête. Travaux importants nécessitant un diagnostic approfondi préalable dans la plupart des cas	Plusieurs semaines ou mois pour les travaux de remédiation définitifs	Faible pour des affaissements étendus de faible amplitude (quelques centimètres). Moyenne à bonne en présence d'indices visuels forts (bitume/barrière/muret : fissures, écartements de joint, ...) ou événements marquants (séisme, crue forte, ...)	Faible à bonne pour la détection de l'EI (à condition de pratiquer une surveillance assidue post-crue et post-événement). Faible à moyenne pour les actions de remédiation (nécessité d'un diagnostic approfondi pour les travaux définitifs)	LIDAR aérien (si mission généralisée > 50 km, post-événementielle), FO déformation : détection et quantification de l'affaissement
	Liquéfaction de la fondation (suite à séisme, très rapide)		Potentiel mais jamais observé					
Affaissement local de la crête à cause non anthropique.	Fontis débouchant en surface	Erosion interne. Souche pourrie.	Moyen	Sondage du fontis à la pelle mécanique, en présence d'un géotechnicien (et comblement éventuel, si souche pourrie à extraire)	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne si surveillance régulière rapprochée ou systématique post-crue.	Bonne pour la détection, nécessite des investigations complémentaires pour la remédiation.	FO déformation en crête : détection avant arrivée en surface.
	Chute d'arbre (souche renversée ou arrachée)	Effondrement karstique en fondation	Rare					
Irrégularité de crête de cause anthropique	Travaux	Activité humaine contrôlée	Courant	Evacuation de la souche et comblement du trou par remblai compacté Abattages préventifs	< 1 semaine Possible en urgence Cas problématique de la conjonction d'une tempête et d'une crue subaffleurant la crête : scénario potentiellement rapide	Bonne si surveillance régulière rapprochée ou systématique post-crue.	Moyen à bon	LIDAR en préventif pour détecter les zones à crête étroite avec arbres hauts.
	Emprunt sauvage de matériaux ou passages transversaux (engins agricoles, motos, piétons, ...)	Activité humaine non contrôlée	Courant	Remise en état en fin de chantier	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne	Bonne (Activité humaine contrôlée)	Aucun
Rupture surélévation secondaire ou non mise en place. (muret, batardeau, etc.)	Présence de portes ou de batardeaux	Phénomène provoqué par la crue ou erreur humaine	Courant	Traitement défaut et signalisation.	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne si surveillance régulière rapprochée	Moyen à bon	Aucun
Exhaussement anormal de la ligne d'eau	Embâcle (barrage naturel en crue)	Phénomène provoqué par la crue	Moyen	Obturation	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne (existence des singularités) à moyenne (état des batardeaux, pratiques de mise en place)	Très mauvaise (EI provoqué par la crue ou par une erreur humaine)	Aucun
	Remblai ou barrage sauvage	Activité humaine non contrôlée	Rare	Evacuation matériaux à la pelle mécanique	< 1 semaine Parfois possible en urgence	Bonne si surveillance régulière rapprochée ou systématique post-crue.	Très mauvaise (EI provoqué par la crue)	Limnimétrie : détection différentiel anormal
	Remblai d'infrastructure (autorisé)	Activité humaine contrôlée mais mal dimensionnée	Moyen	Evacuation matériaux à la pelle mécanique	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne si surveillance régulière rapprochée.	Moyen à bon	Limnimétrie : détection différentiel anormal
	Rétrécissement ou exhaussement du fond naturel du lit	Phénomène lent en général mais qui peut aussi être rapide ou post-crue		Moyen	Mesure compensatoire préalable	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne	Bonne (Activité humaine contrôlée)
				Evacuation matériaux	Plusieurs semaines Impossible en urgence	Faible par un non-spécialiste Moyenne à bonne par un spécialiste	Bonne (EI plus ou moins rapide)	LIDAR en diagnostic géomorphologique initial ou répétition de vols LIDAR pour suivi géomorphologique. Limnimétrie : détection différentiel et/ou niveau absolu anormaux

FO : Fibre Optique  
CT: Caméra thermique  
PE : Panneaux électriques  
PS: Polarisation spontanée  
Li : Lidar  
SV : Surveillance visuelle  
NE : Mesure niveau d'eau - Limnimétrie

**Examen visuel adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale**

**Examen visuel adapté apport d'une surveillance instrumentale**

**Examen visuel pas totalement adapté apport d'une surveillance instrumentale**

**Examen visuel pas totalement adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale**

Analyse de risque générique du risque de surverse

Événement initiateur (EI)				Actions de remédiation (AR) envisageables en cas de détection de l'EI		Performance de la surveillance visuelle (SV) par rapport à l'évènement initiateur		Apports d'une surveillance instrumentale	FO : Fibre Optique CT: Caméra thermique PE : Panneaux électriques PS: Polarisation spontanée Li : Lidar SV : Surveillance visuelle NE : Mesure niveau d'eau - Limnimétrie
Événement initiateur (N1)	Événement initiateur (N2)	Remarques	Fréquence	Actions de remédiation	Délai de mise en œuvre	Efficacité de détection des causes lors d'une SV	Adéquation de la SV au type d'EI et aux AR envisageables		
Défaillance de l'étanchéité (provoquant une élévation de la piézométrie dans le corps de digue ou des surpressions en fondation)	Sécheresse (pour les digues à noyau d'étanchéité en argile)	Phénomène aléatoire	Rare	Recharge poids	< 1 semaine Parfois difficile en urgence	Difficile	Mauvais à moyen si surv. post-sécheresse	FO, CT, PE : détection des fuites suite à élévation du niveau de saturation Piézométrie	
	Vieillessement du masque (pour les digues à masque d'étanchéité)	Phénomène lent	Moyen	Recharge poids	< 1 semaine Parfois difficile en urgence	Difficile	Bonne (phénomène lent)	FO, CT, PE : détection des fuites suite à élévation du niveau de saturation Piézométrie	
Déblais du pied aval	Emprunt sauvage	Activité humaine non contrôlée	Moyen	Traitement défaut	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne	Moyenne (EI aléatoire + délai AR court)	Aucun	
Surcharge non prévue en conception	Surcharge permanente	Configuration permanente ou peu évolutive	Moyen	Renforcement de la digue ou suppression de la surcharge	Renforcement : long et difficile en urgence Suppr. : rapide	Bonne	Bonne (configuration permanente ou peu évolutive)	Aucun	
	Surcharge transitoire	Phénomène aléatoire	Moyen	Renforcement de la digue	Plusieurs semaines Difficile en urgence	Bonne	Mauvaise (EI aléatoire +)	Aucun	
Soulèvement hydraulique (intrusion d'eau dans une fondation avec couche étanche au sommet)	Interface avec des structures enterrées (conduites..)	Configuration permanente ou peu évolutive	Courant	Lest de la digue	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne : sandboils	Moyenne si surv. en crue/post-crue	FO	
	Terriers	Configuration évolutive	Courant						
	Hétérogénéité de perméabilité (remblai homogène).	Défaut d'exécution (non compactage, matériau inadéquat)	Courant						
	Défaillance de l'écran interne (paroi moulée ou rideau de palplanches)	Défaut d'exécution. Vieillessement (perte de liant, corrosion, ...)	Rare						
	Pourrissement de racines.	Phénomène naturel prévisible	Courant						
Vieillessement du masque (pour les digues à masque d'étanchéité)	Défaut d'entretien Phénomène plus ou moins lent	Rare							
Profil inadapté	-	Défaut de conception	Rare	Mise aux normes	Variable	Bonne	Bonne (état permanent et visible)	LiDAR	

■ Examen visuel adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale  
■ Examen visuel adapté apport d'une surveillance instrumentale  
■ Examen visuel pas totalement adapté apport d'une surveillance instrumentale  
■ Examen visuel pas totalement adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale

**Analyse de risque générique du risque d'instabilité**

Événement initiateur (EI)				Actions de remédiation (AR) envisageables en cas de détection de l'EI		Performance de la surveillance visuelle (SV) par rapport à l'événement initiateur		Apports d'une surveillance instrumentale	FO : Fibre Optique CT : Caméra thermique PE : Panneaux électriques PS : Polarisation spontanée Li : Lidar SV : Surveillance visuelle NE : Mesure niveau d'eau - Limnimétrie
Événement initiateur (N1)	Événement initiateur (N2)	Remarques	Fréquence	Actions de remédiation	Délai de mise en œuvre	Efficacité de détection des causes lors d'une SV	Performance de la SV au type d'EI et aux AR envisageables		
Présence d'une zone d'écoulement privilégié traversant la digue	Interface avec des structures enterrées (conduites...)	Configuration permanente ou peu évolutive	Courant	Dépôt de sacs pour casser l'énergie de l'eau (en urgence). Ouvrage drainant contre-filtre en urgence. Reprise de l'ouvrage, nécessitant un diagnostic complet préalable.	Parfois difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Bonne et moyenne (spécialiste) Bonne si surveillance en crue (mais prise de risque par le surveillant) Nulle si conduite oubliée, aux extrémités enfouies.	Bonne (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT LIDAR en appui à l'examen visuel initial : pour repérer les têtes de regard, les entonnements, le bâti encastré, ...	
	Terriers	Configuration évolutive	Courant	Dépôt de sacs pour casser l'énergie de l'eau (en urgence). Ouvrage drainant contre-filtre ou construction d'un "contre-puits" en urgence. Reprise de la portion de digue en travaux définitifs.	Parfois difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Bonne à moyenne (spécialiste) Bonne si surveillance en crue (mais prise de risque par le surveillant) Nulle si conduite oubliée, aux extrémités enfouies.	Bonne (si la détection se fait régulièrement lors des tournées de routine), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT	
Présence d'une zone d'écoulement privilégié traversant la fondation	Interface avec des structures enterrées (conduites...)	Configuration permanente ou peu évolutive	Courant	Dépôt de sacs pour casser l'énergie de l'eau (en urgence). Ouvrage drainant contre-filtre en urgence. Reprise de l'ouvrage, nécessitant un diagnostic complet préalable.	Parfois difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Bonne et moyenne (spécialiste) Bonne si surveillance en crue (mais prise de risque par le surveillant) Nulle si conduite oubliée, aux extrémités enfouies.	Bonne (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT LIDAR en appui à l'examen visuel initial : pour repérer les têtes de regard, les entonnements, le bâti encastré, ...	
Défaillance de l'étanchéité du corps de digue (provoquant un raccourcissement du chemin de fuite)	Sécheresse extrême (pour les digues à noyau d'étanchéité en argile)	Phénomène aléatoire	Rare	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Reprise du noyau nécessitant un diagnostic complet préalable.	Difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Difficile	Mauvaise à moyen si visite post-sécheresse	Au cours de la crue suivante : FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
	Hétérogénéité de perméabilité (remblai homogène).	Défaut d'exécution (non compactage, matériau inadéquat)	Courant	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Reprise de la portion de digue en travaux définitifs.	Possible en urgence si organisation adéquate et écoulements pas trop forts. Parfois difficile. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Difficile	Bonne si surveillance en crue ou post-crue (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
	Défaillance de l'écran interne (paroi moulée ou rideau de palplanches)	Défaut d'exécution. Vieillessement (perte de liant, corrosion, ...)	Rare	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Reprise de l'écran ou autre confortement, nécessitant un diagnostic complet préalable.	Difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Difficile	Bonne si surveillance en crue ou post-crue (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
	Pourrissement de racines	Phénomène naturel prévisible	Courant	Ouvrage drainant contre-filtre. Interventions sur arbres et/ou souches et/ou reprise de la portion de digue en travaux définitifs, nécessitant un diagnostic spécifique préalable.	Difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Moyen	Bonne si surveillance bien organisée. (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue Thèse Irstea en cours : méthodes géophysiques pour détection des racines	
	Vieillessement du masque (pour les digues à masque d'étanchéité)	Défaut d'entretien Phénomène lent	Rare	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Rejoindement du masque.	Possible en urgence si organisation adéquate et écoulements pas trop forts. Plusieurs semaines pour travaux définitifs.	Bonne si masque apparent, difficile si non.	Bonne si surveillance bien organisée. (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
Défaillance de l'étanchéité de la fondation (provoquant un raccourcissement du chemin de fuite)	Hétérogénéité de perméabilité (remblai homogène)	Défaut d'exécution (non compactage, matériau inadéquat)	Courant	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Reprise de la portion de digue en travaux définitifs.	Possible en urgence si organisation adéquate et écoulements pas trop forts. Parfois difficile. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Difficile	Bonne si surveillance en crue ou post-crue (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
	Défaillance de l'écran interne (paroi moulée ou rideau de palplanches)	Défaut d'exécution. Vieillessement (perte de liant, corrosion, ...)	Rare	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Reprise de l'écran ou autre confortement, nécessitant un diagnostic complet préalable.	Difficile en urgence. Plusieurs semaines voire mois pour travaux définitifs.	Difficile	Bonne si surveillance en crue ou post-crue (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
	Vieillessement du masque (pour les digues à masque d'étanchéité)	Défaut d'entretien Phénomène lent	Rare	Ouvrage drainant contre-filtre sur talus côté val, en crue ou post-crue. Rejoindement du masque.	Possible en urgence si organisation adéquate et écoulements pas trop forts. Plusieurs semaines pour travaux définitifs.	Difficile	Bonne si surveillance bien organisée. (configuration permanente ou peu évolutive), mais pouvant être mauvaise si évolution rapide en crue.	FO, CT : détection des circulations au sein de la digue PE : détection évolution résistivité digue	
Irrégularité de la largeur du profil de digue (provoquant un raccourcissement du chemin de fuite)	Emprunt ou déblai sauvage	Activité humaine non contrôlée	Moyen	Traitement défaut	< 1 semaine Possible en urgence	Bonne	Moyen à bon	-	
	Glissement du talus côté cours d'eau à la décrue	Phénomène post-crue	Courant	Rechargement-élargissement en urgence côté val. Traitement défaut	Plusieurs semaines Possible en urgence	Bonne	Bonne si surveillance post-crue (phénomène post-crue)	FO : détection déformation	
	Glissement du talus côté val en crue	Phénomène provoqué par la crue EI N3 : érosion externe de pied	Rare	Rechargement-élargissement en urgence côté val. Traitement défaut	Plusieurs semaines Difficile en urgence	Bonne	Moyenne si surveillance en crue/post-crue et évolution lente, très mauvaise sinon. (EI provoqué par la crue)	FO : détection déformation et/ou circulation d'eau. Piézomètres uniquement si zone fragile pré-identifiée.	
	Erosion du talus côté cours d'eau	Phénomène provoqué par la crue	Courant	Rechargement-élargissement en urgence côté val. Traitement défaut	< 1 semaine Possible en urgence	Plus ou moins facile en crue selon visibilité du talus	Mauvaise à bonne si surveillance post-crue et visibilité du talus.	FO : détection des déformations en pied de digue	

- Examen visuel adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale
- Examen visuel adapté apport d'une surveillance instrumentale
- Examen visuel pas totalement adapté apport d'une surveillance instrumentale
- Examen visuel pas totalement adapté pas d'apport d'une surveillance instrumentale

Analyse de risque générique du risque d'érosion interne (corps de digue et fondation)



### 3.2 ANALYSE

Les quatre scénarios évoqués apparaissent tous de manière significative.

Ainsi l'examen visuel est tout à fait adapté pour l'identification de nombreux indices de dégradation parmi ceux recensés. Compte-tenu de l'occurrence des EI (fréquence, provoqué par un événement extérieur inhabituel connu, etc.) et du rythme classique de l'examen visuel, on considère généralement que l'identification se fera suffisamment en amont pour que des mesures préventives ou curatives soient prises. Les EI pouvant mener à la rupture par surverse, ou la favorisant, sont notamment bien détectés dans l'ensemble, un peu plus difficilement pour les deux autres modes de ruptures majeurs. Dans certains cas, et bien que l'examen visuel soit bien adapté, un apport instrumental est parfois possible et permettrait parfois d'anticiper encore davantage l'apparition de désordres.

Pour autant, bien que leur détection soit tout à fait possible par un opérateur, le caractère imprévisible de plusieurs événements initiateurs réduit drastiquement la capacité d'anticipation offerte par l'examen visuel. Pour certains la détection, voire la caractérisation, est cependant possible par surveillance instrumentale. Il s'agit ici de mesures continues, ou quasi-continues, dans le temps, qui permettent en théorie une bien meilleure réactivité. En particulier des mesures de températures et de déformation par fibre optique, de changement de résistivité par panneaux électriques et de limnimétrie apparaissent comme tout à fait dignes d'intérêt vis-à-vis de certains EI. Cependant, comme explicité dans les fiches techniques, la détection reste pour une majorité de cas très dépendante de l'importance du phénomène en cours, de la position (ou la distance) entre le phénomène et les capteurs et de la conception des digues. Par exemple une fuite au travers de la digue sera ou ne sera pas détectable par mesure de température par fibre optique selon la distance fuite/fibre et l'importance de cette fuite. Le constat de l'apport instrumental ne peut donc qu'être générique. L'intérêt réel doit être validé au cas par cas. De même, les scénarios de dégradation montrent des chemins et des dynamiques d'évolution probable potentiellement très différentes selon la conception de la digue (digue homogène, digue zonée, digue à écran d'étanchéité).

En outre, la complexité introduite par le caractère transitoire des principales sollicitations hydrauliques que subissent les digues (i.e. celles liées à la crue) vis-à-vis de mécanismes à l'évolution plus ou moins lente - et à seuil(s) - tels que l'érosion interne n'est pas négligeable. En effet, une érosion interne peut s'amorcer lors d'une crue donnée, évoluer plus ou moins rapidement lors des crues suivantes en affaiblissant progressivement et sournoisement l'ouvrage - mais sans le rompre - puis conduire à sa ruine (brèche) en quelques minutes lors d'une "ultime" crue. Il faut donc distinguer les indices que l'on peut détecter, suivre et analyser - par la surveillance ou l'auscultation en crue ou en post-crue - d'une crue à l'autre (avec en principe un certain temps de réaction pour les actions de remédiation) de ceux à détecter et à suivre au cours d'un même épisode de crue vis-à-vis d'un phénomène à évolution rapide susceptible de ruiner la digue.

De plus, pour que les techniques de surveillance instrumentales soient utilisables, il est indispensable qu'elles soient liées à un schéma organisationnel. En effet, pour chaque technique, des compétences sont nécessaires pour collecter, traiter, analyser et interpréter les données brutes. Un personnel formé et qualifié, intervenant dans le processus au moment opportun, est la clé d'une instrumentation efficace, base d'une surveillance opérationnelle.

Enfin, il persiste un certain nombre d'évènements initiateurs que ni l'examen visuel ni la surveillance instrumentale ne permettent de détecter, ou détecter suffisamment tôt. Les cas identifiés provoqués par un emprunt sauvage de matériau sont cependant peu fréquents. Les cas de ravinement de rupture de la ligne de crête par cause naturelle témoignent de l'importance d'adapter la fréquence des examens visuels aux événements extérieurs (fortes pluies, séisme, tempête, etc.).

### **3.3 INTÉGRATION DE LA SURVEILLANCE DANS L'ÉTUDE DE DANGERS**

L'ensemble de nos réflexions développées dans le cadre de la sécurité des ouvrages hydrauliques nous conduit à ne pas considérer la surveillance comme une barrière de sécurité<sup>8</sup>, du moins selon le concept utilisé dans les installations classées.

En effet, définir une barrière de sécurité nécessite de définir une fonction de sécurité, c'est-à-dire une fonction prévue pour maintenir ou atteindre un état de sécurité. Pour un système de sécurité complexe, cette fonction de sécurité peut nécessiter l'acquisition de données suivie d'un traitement, puis d'une action permettant d'aboutir à un état de sécurité satisfaisant. Ces trois maillons doivent être définis a priori pour s'enchaîner de manière systématique, le plus souvent dans un temps relativement court (voire en temps réel), même lorsqu'une intervention humaine est intégrée à l'un des trois maillons de la chaîne fonctionnelle.

Dans cette optique, notre analyse des techniques instrumentales de surveillance des digues, capitalisée dans les tableaux d'analyse générique des risques présentés ci-avant, a consisté à considérer systématiquement quelle action permettrait d'interrompre la séquence accidentelle concernée. Il est apparu que selon le type de phénomène, l'action ne peut être réellement envisagée et définie précisément *a priori*, c'est-à-dire que la phase de traitement joue un rôle considérable qui ne peut pas être établi de manière systématique. C'est notamment le cas lorsque l'action est une campagne de travaux, ce qui nécessite en pratique des phases supplémentaires d'investigation et de réflexion, avant de pouvoir prendre une décision sur les travaux à mettre en place. La dynamique de la surveillance traditionnelle des digues associée à des travaux de réhabilitation ou d'entretien assez conséquents ne correspond donc pas à celle des barrières de sécurité et il n'est donc pas possible d'évaluer a priori l'efficacité et le temps de réponse d'une action basée sur la surveillance.

En conclusion, dans le cas des digues, la surveillance est principalement mise en œuvre pour suivre l'évolution de grandeurs physiques représentatives de l'état de

---

<sup>8</sup> Par définition, une barrière de sécurité est l'ensemble d'éléments techniques ou humains nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On les appelle aussi des Mesures de Maîtrise des Risques (MMR).

la digue et détecter une situation à risque. Elle diffère en ce sens des barrières de sécurité considérées, dans l'industrie, qui sont conçues et mises en œuvre pour répondre à un objectif précis de sécurité en fonction d'un scénario accidentel dont la cinétique et le dimensionnement sont connus.

Notons quand même une exception pour les situations d'urgence, en crue, où la surveillance associée à une action de confortement provisoire immédiate (mise en place de sacs de sable / batardeaux / filtre-drains provisoires) semble être, à notre avis, en adéquation avec le concept des barrières de sécurité. Il s'agirait donc dans ce cas d'une formalisation et d'une meilleure préparation de ces actions d'urgence qui sont parfois entreprises sur les digues en dernier ressort.

Ce constat général sur la difficulté de rendre compte de la surveillance dans une barrière de sécurité ne doit cependant pas masquer l'apport en information et en réactivité apporté par les techniques instrumentales. De plus, il est tout à fait possible de valoriser le gain apporté par ces techniques dans l'étude de dangers en dehors du concept de barrières de sécurité. En effet, la quantification théorique en probabilités des scénarios accidentels de rupture pour les digues dépend de la durée pendant laquelle la digue se trouve dans un état dégradé. Ainsi, la réduction de cette durée au minimum possible diminue de fait la probabilité du scénario accidentel correspondant. Une technique instrumentale permettant de réduire le temps d'indisponibilité de la digue aura donc une influence directe sur la probabilité du scénario concerné et pourra donc être fortement valorisée dans l'étude de dangers.

### **3.4 CAS DES DIGUES MARITIMES**

La démarche réalisée ci-dessus pour le cas des digues fluviales n'a pas été reconduite dans le contexte maritime. Certaines remarques peuvent néanmoins être formulées :

- le suivi du niveau d'eau (niveau de la mer) est un problème beaucoup plus complexe en maritime qu'en fluvial. Ce niveau doit être envisagé en tenant compte des perturbations basse fréquence (marées, variations atmosphériques) et haute fréquence (houle) qu'il subit. Sa mesure devient donc beaucoup plus complexe, surtout au regard de la houle. A ce titre, les techniques de limnimétrie proposées dans ce rapport ne sont pas applicables en maritime et les événements initiateurs évoqués dans l'évaluation de barrière de sécurité de la surveillance face au risque de surverse ne s'appliquent pas non plus strictement.

Par ailleurs, l'influence de la topographie des environs de la digue (érosion de plage par exemple) est primordiale et doit impérativement être intégrée à la surveillance de la digue, en tant que facteur aggravant et donc qu'événement initiateur.

La surveillance vidéo peut être évoquée pour permettre à la fois un suivi du niveau de la mer, particulièrement pertinent en période de forte sollicitation. L'approche vidéo peut combiner l'avantage d'une appréciation humaine avec la sécurité d'une télémessure, très difficile à garantir sur le terrain en période de tempête par exemple. Le suivi de la topographie environnante pourrait également être considéré (à marée basse par exemple), associé à des mesures plus classiques et largement éprouvées de bathymétrie ;

- la houle implique également des franchissements d'eau de mer par-dessus la digue maritime, même en fonctionnement normal de la digue. Une augmentation inhabituelle de ces franchissements représente par contre un risque de dégradation de la digue côté val. Ces franchissements devraient être pris en compte dans le cadre d'une étude similaire à celle menée pour le cas fluvial.

Pour autant, malgré les spécificités non exhaustives évoquées ici, les conclusions exprimées dans les deux sections précédentes restent valables. Un grand nombre d'événements initiateurs sont communs aux deux domaines, tout comme les moyens possibles de surveillance, par examen visuel ou de manière instrumentale.

## 4. CONCLUSIONS

### 4.1 L'IMPORTANCE DE LA PRATIQUE DU « TERRAIN »

Sans tenir compte de l'aspect financier ou de la faisabilité technique, de nombreuses techniques existent pour la surveillance des digues et présentent un réel intérêt pour surveiller une digue comme le montrent les études de dangers proposées. Pour autant leur emploi n'est certainement pas équivalent, comme le rappelle le tableau ci-dessous.

Technique	Pertinence de la mesure (hors historique)			Mécanismes surveillés
	Avant crue	En crue	Post-crue	
Examen visuel	Oui	Oui	Oui	Tous
Limnimétrie	Oui	Oui	Oui	Tous mais en particulier surverse
Fibre optique – température	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
Fibre optique – déformation	Oui	Oui	Oui	Érosion interne, Érosion externe
Panneaux électriques	Oui	Oui	Oui	Érosion interne
Polarisation spontanée	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
Thermométrie infrarouge	Faible	Oui	Faible	Érosion interne
LiDAR aéroporté haute définition	Oui	Non	Oui	Tous

L'examen visuel, et dans une moindre mesure la cartographie par LiDAR haute définition, sont les seules techniques permettant de surveiller et d'anticiper potentiellement l'ensemble des mécanismes de rupture, avec toutefois plus ou moins d'efficacité tant en termes de réussite que de précocité de la détection. Par exemple, le LiDAR ne pourra détecter des phénomènes avérés d'érosion interne que très tardivement, une fois que les conséquences de cette érosion seront visibles ou décelables à l'extérieur des ouvrages (et pour une crête de digue propre ou revêtue, déjà topographiée auparavant), à l'instar de l'examen visuel. Cependant, les autres techniques 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 ou d'inondation, ce qui réduit drastiquement leur capacité d'anticipation de la rupture. Enfin, un point faible de nombreuses techniques instrumentales évoquées (panneaux électriques, thermométrie infrarouge, polarisation spontanée, mesure de température par fibre optique) est la difficulté de l'interprétation des mesures. Pour une majorité, seule une confrontation des mesures avec la réalité du terrain permet d'espérer une certitude quant aux évolutions affectant la digue.

## 4.2 COMPLÉMENTARITÉ DES APPROCHES

Pour autant, l'examen visuel et le LiDAR présentent eux-mêmes des limites qui peuvent, ou pourraient, être avantageusement palliées par des techniques instrumentales complémentaires. Même si de nombreux indices d'évolution se trouvent en surface de digue, la première limite est la difficulté, voire l'impossibilité, d'étudier l'intérieur de la digue ou les parties immergées. A ce titre, sur certains tronçons jugés plus à risque par exemple, on peut tout à fait envisager une instrumentation complémentaire 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 l'examen visuel. En crue, les contraintes de temps, amplifiées par une gestion rigoureuse nécessaire de la sécurité des intervenants, peuvent rendre difficile le déploiement d'équipes expérimentées sur de grands 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 peuvent être justement spécialement mobilisés pour d'autres activités en période de crise. Par une technique instrumentale, on peut alors tout à fait envisager d'optimiser le travail d'examen visuel en soulignant certaines zones suspectées d'être en évolution. 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 lorsqu'elle n'est pas gênée par la végétation. Elle mérite également d'être approfondie dans le cas des digues.

L'apport de la surveillance instrumentale doit être nuancé par la faisabilité technique et financière de l'instrumentation. En effet, si la mesure de résistivité électrique par panneaux électriques à demeure est potentiellement pertinente pour détecter l'érosion interne, il semble peu raisonnable d'imaginer déployer un tel système sur un linéaire de digue de plusieurs dizaines de kilomètres. Quelle que soit la technique, l'adéquation sera toujours fonction des enjeux, des événements initiateurs effectivement identifiés sur le tronçon (par connaissance du terrain et de l'environnement, caractérisation géotechnique/géophysique, etc.).

Un effort doit être fait pour développer une surveillance instrumentée efficace particulièrement en période de crue, amenée même à prendre le relais des opérateurs lorsque leur sécurité n'est plus assurée et qu'ils ont été rappelés par le responsable d'opérations compte tenu des risques de rupture de digue. En effet, c'est lorsque les digues sont en charge qu'il y a le plus de chose à observer mais c'est aussi le moment où le risque peut devenir important pour les opérateurs et les personnes. Grâce à la télésurveillance et à la mise en place de techniques de surveillance complémentaires sur un même ouvrage, il serait possible de caractériser l'évènement tout en garantissant la sécurité des personnes, en période de crise. De plus, une surveillance instrumentée serait utile en période de crue en conditions nocturnes où l'examen visuel est quasi-impossible.

### **4.3 LA SURVEILLANCE, UNE BARRIÈRE DE SÉCURITÉ ?**

Enfin, notre étude nous a amené à envisager les techniques de surveillance instrumentales en tant que barrière de sécurité selon le sens employé dans les installations classées. Dans le cas des digues, la surveillance est principalement mise en œuvre pour suivre l'évolution de l'état de la digue et détecter au plus tôt une situation à risque. Elle n'est pas aujourd'hui associée à des scénarios accidentels précis et ne peut donc pas être considérée strictement comme une barrière de sécurité. Subsistent néanmoins quelques cas de figures, en situation de crue notamment, où la surveillance permet de détecter une dégradation des caractéristiques de la digue et de mettre en œuvre une action de confortement.

Pour autant la surveillance instrumentale peut apporter des informations pertinentes, que l'on peut intégrer dans une étude de dangers, notamment avec l'objectif de réduire la durée pendant laquelle une digue est dans un état dégradée.



## 5. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe A	Fiche détaillée Examen visuel	16 A4
Annexe B	Fiche détaillée Limnimétrie Sonde de pression	5 A4
Annexe C	Fiche détaillée Limnimétrie Radar	7 A4
Annexe D	Fiche détaillée Fibre optique	11 A4
Annexe E	Fiche détaillée Imagerie thermique	7 A4
Annexe F	Fiche détaillée Panneaux électriques	7 A4
Annexe G	Fiche détaillée LiDAR	11 A4
Annexe H	Fiche détaillée Polarisation spontanée	5 A4



**Annexe A**  
Fiche détaillée Examen visuel



## Technique de mesure : Examen visuel

Technique de mesure	Caractéristique mesurée	Mécanismes de défaillance
Parcours à pied du linéaire de la digue, en répertoriant toutes les informations visuelles sur les désordres ou les présomptions de désordre.	Singularités, désordres ou indices visuels de surface pouvant être sources directes ou indirectes de mécanismes de dégradation ou de rupture ou résulter de tels mécanismes.	Tous mécanismes (recherche d'indices directs ou indirects de mécanisme de dégradation ou de rupture).

Les quatre formes d'examen visuel des digues [Mériaux, Royet & al., 2004] sont successivement abordées :

- Examen visuel initial ;
- Surveillance programmée ;
- Surveillance en crue ;
- Surveillance post-crue.

L'essentiel de cette fiche (sections 1 à 6) concerne la surveillance des digues **fluviales** (i.e. de protection contre les inondations de cours d'eau). L'application aux digues **maritimes**, fait l'objet de la section 7.

## **1. JUSTIFICATION, PRINCIPE ET PÉRIODICITÉ**

### **1.1 EXAMEN INITIAL ET SURVEILLANCE PROGRAMMÉE<sup>1</sup>**

D'une façon générale :

Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue et ses ouvrages annexes se révèlent par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, suintements, terriers de fousseurs, sorties de canalisation, fissures, déplacements, etc. L'examen visuel constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et il s'avère incontournable pour établir un état initial (examen initial) de la digue. Puis, il en permet le suivi ultérieur (examen programmé).

Le principe général de la surveillance par le gestionnaire consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue, en répertoriant toutes les informations visuelles sur les désordres ou les présomptions de désordres affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

---

<sup>1</sup> Les tournées d'examen visuel initial ou de surveillance programmée se pratiquent en principe digue « non en charge » ou digue « à sec ». L'examen visuel initial peut être assimilé à la première visite de surveillance programmée.

Pour les digues bordées par le cours d'eau, et si nécessaire, la surveillance doit être complétée périodiquement par :

- une reconnaissance par barque (cas d'un pied de talus subvertical, inaccessible et/ou boisé) ;
- une visite subaquatique (cas d'un perré ou d'une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage).

En ce qui concerne la périodicité des visites de surveillance, il convient qu'elle soit adaptée, d'une part à l'importance des enjeux protégés, et d'autre part au niveau des sollicitations auxquelles la digue est exposée. A ce titre, on peut émettre les recommandations suivantes :

- au minimum une visite annuelle de surveillance à pied pour les digues non sollicitées par les crues courantes ;
- deux visites annuelles pour les digues régulièrement sollicitées par les petites crues et pour les digues protégeant des enjeux forts ;
- une reconnaissance annuelle par barque lorsque celle-ci se justifie ;
- un examen subaquatique tous les 10 ans dans les cas où ce dernier est nécessaire ;
- une tournée de surveillance après chaque crue significative (cf. ci-après).

En tout état de cause, l'arrêté du 11/12/2007 et son arrêté d'application du 29/02/2008 stipulent que les modalités de surveillance des digues en toutes circonstances (y compris en crue) doivent faire l'objet de consignes écrites élaborées sous la responsabilité de leur propriétaire. Sauf pour les digues de classe D, ces consignes doivent être soumises à l'approbation préalable du préfet.

#### Conditions et moyens de mise en œuvre

Afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales, les tournées de surveillance doivent se dérouler après un dégagement soigné de la végétation herbacée et arbustive et, si possible, hors période de végétation (automne et hiver).

L'équipe de terrain est formée d'une brigade de deux (ou trois) agents ayant une bonne connaissance des ouvrages. L'intervention au minimum en binôme doit être exigée pour garantir l'exhaustivité, la pertinence de l'inventaire et pour la sécurité des opérations.

Le repérage se fait à l'aide d'un Topofil (dispositif à fil perdu), complété d'un ou deux décamètres. L'utilisation d'un récepteur GPS portable est intéressante si toutefois un couvert forestier dense n'empêche pas la réception du signal GPS au sol.

En préalable à la visite de surveillance, il est indispensable de se munir :

- des plans et des profils de la digue qui permettront le repérage et le report des observations - l'idéal en la matière étant de pouvoir disposer d'un plan au 1/500 ;
- des plans de détails des ouvrages mobiles (vannes, clapets, déversoirs) ;

- des documents contenant les observations de la (des) précédente(s) visite(s), pour comparer les évolutions quelque soit le désordre.

Les agents doivent être équipés d'une tenue adaptée (bottes voire cuissardes le cas échéant, gilets de sauvetage pour les reconnaissances en barques ou sur des talus raides bordant le cours d'eau,...). Afin de comparer objectivement des observations à des dates successives, il est recommandé d'avoir un appareil photographique, idéalement couplé à un récepteur GPS, pour des prises de vue de désordres. Enfin, il faut prévoir le nécessaire pour la prise de notes, le dictaphone de poche étant, de ce point de vue, un outil bien pratique.

Le report des informations se fait sur une fiche type adaptée aux particularités de l'ouvrage.

### Points à observer et informations à répertorier

Si, comme cela est souhaitable, on dispose d'un plan topographique détaillé, il convient d'abord de vérifier et compléter les informations qui y sont portées au fur et à mesure de la progression.

Il est recommandé de conduire l'observation des désordres par parcours méthodique de la digue. Pour les digues fluviales, un inventaire exhaustif des points à observer est proposé dans la bibliographie du Cemagref-Irstea [Mériaux, Royet et al. 2004], selon les mécanismes de rupture redoutés, pour les trois différentes parties d'ouvrage à examiner. Dans les deux formes d'opération (examen initial et surveillance programmée), effectuées digue à sec, ce sont les mêmes indices qui sont recherchés. Bien sûr, la surveillance programmée s'attache en plus à suivre les évolutions des désordres, ce qui nécessite de la mener en possession des documents de restitution des visites de surveillance précédentes. Il est également nécessaire de penser à indiquer les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes de la rivière et des éventuels plans d'eau côté terre).

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux maisons, constructions, débouchés ou regards de galerie ou canalisation situées à proximité de, ou encastrées dans, le corps de digue. Les points bas en crête, souvent batardables et liés à des circulations en travers de la digue, sont également à examiner. Il convient de décrire en détail ces singularités et de les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas - ou incomplètement - pris en compte.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient absolument de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps : si un entretien ou une remise à niveau préalable s'avère nécessaire).

### Modalités de report et de restitution des informations

Les désordres et informations répertoriés sont consignés sur une fiche de visite au format approprié. Le Cemagref-Irstea en propose un modèle dans « Mériaux, Royet & al., 2004 ».

En outre, il est établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé, géoréférencé, et daté : photos de désordre, référencées et légendées ainsi que des photos d'ensemble.

### Examen des déversoirs

Les dégradations sur les déversoirs massifs en béton ou en maçonnerie sont de même nature que celles des murs en béton : fissures structurales, phénomènes de vieillissement du béton ou de la maçonnerie.

Les dégradations sur les déversoirs revêtus d'un perré en maçonnerie sont liées au vieillissement des pierres ou du liant de la maçonnerie. Les pierres peuvent être sensibles aux cycles gel - dégel et, plus rarement, à l'érosion mécanique ou à la dissolution. Le mortier, quant à lui, peut être l'objet de dégradations physico-chimiques : le ciment, selon sa qualité initiale, subit des altérations chimiques qui fragilisent le mortier et le rendent poreux et donc plus sensible aux cycles gel - dégel, au développement de végétation ou à l'érosion hydraulique.

Des particules de terre peuvent aussi se déposer sur les joints de maçonnerie, constituant des milieux propices à la germination des graines et au développement des végétaux, dont les racines ont vite un effet destructurant sur les joints de maçonnerie, voire à terme sur les structures elles-mêmes quand les racines occupent toute l'épaisseur du joint.

Pour les déversoirs en gabions ou matelas Reno, les dégradations sont essentiellement de deux ordres : corrosion et rupture des fils des cages, déplacement des matériaux à l'intérieur des cages entraînant la déformation de ces dernières.

De plus, les déversoirs peuvent subir des dégradations par érosion hydraulique. Ces dégradations concernent le déversoir lui-même, où des pierres peuvent être emportées par le flot sur le seuil, le coursier ou le radier aval. Elles concernent aussi la zone en aval du radier sous la forme d'affouillements et de creusement de fosses d'érosions pouvant aller jusqu'à des sous-cavages du radier.

### Examen des ouvrages singuliers

Ces ouvrages peuvent être très divers : passages batardables, rampes d'accès au fleuve, aqueducs, galeries, conduites, constructions dans la digue, etc.

En fait, la première tâche à réaliser dans le cadre de l'examen initial de ces ouvrages, consiste à en assurer l'inventaire le plus exhaustif possible et à les repérer précisément sur les plans. Les visites de surveillance permettront de relever les désordres éventuels ainsi que de repérer des ouvrages singuliers non encore répertoriés. La prise de vue photographique sera un moyen privilégié de suivi des dégradations.

Si nécessaire, des examens télévisuels des conduits non accessibles à l'homme sont à prévoir.

## 1.2 EXAMEN VISUEL EN CRUE

### 1.2.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'objectif général de la surveillance en crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état "en charge" de la digue, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des visites de surveillance « à sec ») et/ou susceptibles d'en annoncer la rupture prochaine. Ces désordres peuvent résulter de contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue en charge, au cours d'une crue du cours d'eau. Il se peut donc que cette visite se déroule en situation de crise (plan d'alerte de crue), mobilisant les personnels à des tâches urgentes. Une autre difficulté réside dans le fait que le constat de l'un ou l'autre des indices de désordre en crue peut précéder de très peu une rupture dangereuse de l'ouvrage.

Outre la nature des indices de désordre à plus particulièrement observer, l'examen visuel en crue se distingue de la surveillance à sec par plusieurs aspects importants :

- Elle se pratique sous deux formes, d'ailleurs non exclusives l'une de l'autre:
  - . Examen linéaire d'un plus ou moins large secteur prédéfini à but d'y vérifier le fonctionnement critique de la digue et de parfaire la connaissance de l'ouvrage et de ses défauts d'étanchéité ;
  - . Examen ponctuel d'une zone restreinte et circonscrite de digue où ont été signalés par des témoins - ou sur laquelle on redoute a priori (ex : ouvrage singulier) - des désordres (fuites, surverse, ...) et leurs conséquences.
- Le moment (et la saison) de la visite est imposé par les événements, qui peuvent en outre exiger des interventions en conditions nocturnes (crues courtes ou pic de charge durant la nuit). Le délai de préparation est plus ou moins court. En conséquence, si les talus et/ou les abords de la digue sont mal entretenus (végétation), on ne disposera guère de temps pour faire effectuer un débroussaillage préalable (d'où l'intérêt d'assurer un entretien régulier des ouvrages afin de maintenir en toutes circonstances des conditions de visibilité optimales) ;
- Les observations effectuées au titre de la visite en crue peuvent rentrer dans un processus de gestion de crises et conditionner des procédures d'évacuation de zones de population exposées ou la mise en œuvre de travaux conservatoires avec des moyens manuels ou mécaniques (ex : obstruction de passages busés, confortements divers, colmatage de brèches). En s'attachant aux points essentiels de la visite, il est donc nécessaire de couvrir un maximum de linéaire de digues en un minimum de temps et de disposer, en outre, de moyens de communications rapides ;

- Les évolutions à suivre peuvent être rapides et les informations recueillies doivent être rattachées à une échelle de temps fine (de l'ordre de la minute ou à tout le moins du quart d'heure) ;
- Les opérateurs de terrain sont potentiellement exposés à des risques corporels et des mesures doivent être prises pour assurer leur sécurité. Parmi celles-ci, un éventuel seuil d'intensité de crue au-delà duquel l'examen visuel en crue est arrêtée et les équipes de terrain rapatriées. Les interventions de nuit sont encore plus délicates et les consignes et marges de sécurité doivent y être renforcées par rapport à des interventions de jour.

Tous ces éléments imposent de définir, **hors période de crise**, les modalités pratiques de mise en œuvre de la surveillance en crue et, si possible, de les tester par des exercices de simulation. On rappelle d'ailleurs à ce sujet que les consignes écrites de surveillance des ouvrages englobent celles relatives à la gestion en crue (cf. art. 5.1.4 de l'arrêté du 29/02/2008). Le propriétaire doit les établir et, pour les digues de classe A, B ou C, soumettre au visa préalable du préfet en application du décret du 11/12/2007.

### **1.2.2 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER**

Pour les digues fluviales et à l'instar de la surveillance à sec, un inventaire exhaustif des points à observer est proposé dans la bibliographie du Cemagref-Irstea [Mériaux, Royet et al. 2004].

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il est particulièrement recommandé de procéder au relevé des mesures. Ceci au moins pour les instruments qui sont accessibles sans danger. En effet, c'est dans cette seule situation que l'état de saturation de la digue pourra être apprécié.

### **1.2.3 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS**

Il semble difficile d'imposer une saisie en fiche directement sur le terrain, surtout lorsque l'intervention a lieu en situation de crise (forte crue). Dans un souci de rapidité, il convient de saisir les informations dans un carnet de notes sous la forme la plus simple, avec au minimum pour chaque observation : une référence PK (ou un « waypoint » GPS), un élément de repérage transversal même sommaire (ex : bas - milieu - haut du talus côté Val), une description succincte assortie d'un croquis éventuel, la référence des photos prises et la mention de l'heure (en plus de la date du jour). On recommande l'utilisation d'un dictaphone qui permet d'enregistrer rapidement toutes les données listées ci-dessus.

Dans tous les cas, une fois la situation de crise passée, les notes de terrain et/ou les enregistrements, issus de la surveillance en crue, devront être exploités par le service gestionnaire afin de compléter la connaissance de la digue. Il est recommandé, à ce titre, de conduire une visite de surveillance post-crue destinée à valider les observations en crue (vérification/amélioration du repérage) et à apprécier les dernières évolutions des désordres.

## **1.3 EXAMEN VISUEL POST-CRUE**

### **1.3.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE**

L'objectif général de l'examen visuel post-crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état "de charge" que vient de connaître la digue. Il s'agit en quelque sorte d'une visite « programmée » particulière, réalisée juste après la crue, permettant de révéler les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des visites à sec) et/ou, lors d'une intervention après une (ou des) visite(s) en crue, de valider, vérifier et compléter les informations recueillies lors de celle(s)-ci. Par ailleurs, elle peut servir de base à l'établissement d'un programme de travaux d'urgences destinés à réparer les dégradations les plus graves que la digue ou les déversoirs ont pu subir lors de la crue.

Elle doit être réalisée dans les meilleurs délais après la crue, afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.) et avant que ceux-ci ne s'estompent ou ne s'effacent. Son efficacité tout comme son rendement dépend de l'état d'entretien de la digue.

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue ayant été récemment en charge, suite à une crue du cours d'eau. Il se peut donc que cette visite succède à une (ou plusieurs) visite(s) en cours de crue effectuée(s) sur tout ou partie du linéaire concerné. Dans ce cas, elle va alors permettre de vérifier et compléter les informations recueillies.

### **1.3.2 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER**

Les désordres, dont on recherche plus particulièrement les indices, peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Pour les digues fluviales et à l'instar de la surveillance en crue, un inventaire exhaustif des points à observer est proposé dans la bibliographie du Cemagref-Irstea [Mériaux, Royet et al. 2004].

Si la crue a été suffisamment forte pour provoquer la mise en service d'un ou plusieurs déversoirs (ce qu'il convient de vérifier), ceux-ci doivent faire l'objet d'un examen approfondi en vue de repérer toutes traces d'érosion ou d'affouillement. Ces désordres provoqués par une crue sont souvent graves et doivent susciter des réparations rapides. Ceci avant l'arrivée d'une autre crue, faute de quoi les dégradations seraient nettement amplifiées, pouvant conduire à la rupture complète du déversoir.

### **1.3.3 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS**

Les opérateurs de la visite de surveillance post-crue utilisent des fiches standard de relevé des désordres, mises à leur disposition par le gestionnaire des digues. Il peut s'agir du même modèle de fiche que celui utilisé pour les visites à sec.

En outre, il est établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé et daté.

Par la suite, ces informations sont mises au propre (ou reportées en cas d'enregistrement sur magnétophone) et archivées au bureau.

## **2. MÉCANISMES DE DÉGRADATION OU DE RUPTURE SURVEILLÉS**

L'examen visuel sous l'une ou l'autre de ses quatre formes, couplée à l'utilisation des documents qui peuvent lui servir de supports (ex : plan topographique détaillé), 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 :

- Les mécanismes résultant d'une topographie ou d'une configuration défavorable de l'ouvrage (ex : pente raide des parements), de son environnement (ex : érosion de berge proche du pied de digue), ou de l'absence d'un ouvrage de protection (ex : inexistence d'un revêtement maçonné) ;
- Les mécanismes ayant un impact sur la topographie ou l'aspect visuel de l'ouvrage ou de son environnement (ex : fontis, érosions externes, ...)
- Ceux susceptibles d'être favorisés par des singularités partiellement visibles en surface (ex : gros terrier, regard de conduite, végétation arborée, ...).

Mécanisme de rupture :	Points d'observation	Examen visuel post-cruie		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Erosion interne	<i>Végétation</i>	Recherche de cavitations autour des souches		Vérification d'indice de fuites autour des souches
	<i>Terriers</i>	Repérage et examen des gros terriers	Repérage et examen des gros terriers	Repérage des gros terriers - Vérification d'indice de fuites
	<i>Canalisations / traversée</i>	Recherche de cavitations autour des entonnements	Fontis, affaissement en crête sur le tracé présumé de l'ouvrage	Vérification d'indice de fuites
	<i>Confortement côté rivière ou côté val</i>	Etat, comportement au ressuyage		Vérification d'indice de fuites au débouché des drains
	<i>Ouvrages singuliers encastrés dans l'un des talus</i>	Recherche de cavitations sur les surfaces de contact avec le remblai		Vérification d'indice de fuites
	<i>Fuite</i>			Rigoles, fuites résiduelles, suintements, zones humides ou saturées sur le talus ou son revêtement, au pied des souches, au débouché des terriers, canalisations, drains du confortement aval, sur les bâtiments encastrés ou autres ouvrages singuliers. Résurgences persistantes, au delà du pied de talus, dans les fossés, canaux, dépressions, puisards, puits, etc
	<i>Recherche d'indices de renard ou d'existence de vide(s) dans le remblai ou sa fondation</i>	Fontis, cavitations singulières, débouchés amont de renard	Fontis, affaissements	Fontis Turbidité des eaux des écoulements résiduels constatés. Si renard constaté : localisation et dimensions de l'orifice aval.
	<i>Saturation, piézométrie élevée dans le talus côté val</i>		Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres	Vérification de la portance du sol. Relevé des piézomètres, de la côte d'eau dans les puisards, puits, etc.
	<i>Glissement du talus côté val</i>		Fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissurations, renversements) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets ..., vers le bord côté val de la crête	Fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés

■ = indices à observer plus particulièrement

La bibliographie Cemagref-Irstea déjà citée [Mériaux, Royet & al., 2004] propose des tableaux d'identification des indices visuels à rechercher par mécanisme de rupture. A titre d'exemple, nous reproduisons ci-avant un extrait de tableau récemment adapté [Mériaux, 2012] de cette référence pour la recherche d'indices d'érosion interne d'une digue fluviale à l'occasion d'une surveillance post-crue (cf. figures 1a et 1b).



**Figures 1** : Photos d'indices d'érosion interne prises au cours d'une tournée de surveillance post-crue : 1a (à gauche) Sand-boils (volcans de sable) / 1b (à droite) Fontis en crête de digue.

L'examen visuel ne reste toutefois qu'un élément de contribution à la démarche de diagnostic approfondie de la digue qui fait appel à d'autres phases incontournables [Lino, Mériaux, Royet, 2000] : études historiques, études hydraulique et géomorphologique, investigations et études géotechniques, etc.

### **3. RAYON D'ACTION**

Sauf pour le cas de la surveillance en crue (lors de laquelle le talus côté cours d'eau est plus ou moins immergé), l'examen visuel couvre l'ensemble des parties extérieures de la digue et de son proche environnement. Les informations sur des éléments de constitution interne ne peuvent être obtenues qu'indirectement : regards révélant la présence d'une conduite, petit déblai en débouché de terrier permettant d'apprécier la nature locale du sol de la digue, etc.

Sur toutes les surfaces examinées, la végétation constitue une gêne. L'herbe haute ou les cannes masquent l'état de surface du sol. La végétation buissonnante, et notamment épineuse, peut considérablement empêcher l'accès et la circulation pédestres, sans moyens spéciaux (débroussailleuse).

Il est indispensable de ne pas limiter l'examen visuel aux seules trois parties du remblai sensu stricto de la digue. Si ces zones sont accessibles, c'est-à-dire d'observer les pieds de digue et une bande d'au minimum 5 m au delà (y compris la berge si elle est présente côté cours d'eau). L'examen du pied de digue côté rivière ou de la berge peut nécessiter une opération d'observation par barque.

Côté cours d'eau, même au cours d'une inspection par barque, les observateurs ne pourront pas examiner les parties immergées des digues nécessitant des moyens subaquatiques. Sauf incident grave, on ne mobilisera de tels moyens spéciaux qu'à l'occasion des « examens techniques complets » décennaux pour les digues de classe A : d'où la recommandation d'effectuer les examens à sec en conditions de basses eaux (ou de basse mer pour les digues maritimes), afin de bénéficier de la plus grande surface de visibilité.

De même, les conduites ou les passages traversants ne sont souvent pas visitables sans moyens spéciaux. Il est alors important de bien tracer, dans le dossier de la digue, les visites spéciales de ces ouvrages – et leur compte-rendu – lorsqu'elles sont effectuées.

## 4. TRAITEMENT DES DONNÉES ET LIVRABLES

Le temps des indispensables (mises au propre au bureau des informations et d'écriture des légendes des photographies) ne doit pas être sous-estimé. A titre d'ordre de grandeur, il est nécessaire de prévoir une journée de bureau pour une journée de brigade de terrain.

Au final, une tournée d'examen visuel fournit :

- un jeu de fiches de relevés relatives à la visite ;
- la série de photographies légendées s'y afférant ;
- des plans et profils annotés.

Quelques grands gestionnaires de digue se sont dotés de l'outil SIG « SIRS Dignes » [Maurel, Mériaux & al., 2000] qui permet la saisie et le stockage informatiques des informations collectées sur le terrain en vue de faciliter leur exploitation ultérieurement. Certains gestionnaires (SNCF, AD Isère-Drac-Romanche) commencent à utiliser des planchettes informatiques de saisie sur le terrain.

Bilan technicité requise

	Opérateur		Technicien supérieur			Ingénieur			Expert		
Collecte des données											
Traitement											
Interprétation											

## 5. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE

Les examens visuels sont pratiqués, avec succès, depuis des décennies dans le domaine de la gestion des grands barrages. Ils forment un des piliers du processus de surveillance, bien que certains de ces ouvrages soient équipés de très nombreux capteurs. En effet, rien ne peut remplacer l'appréciation intégratrice d'un opérateur humain averti et ayant une bonne connaissance de l'ouvrage qu'il surveille.

Sous l'impulsion de la réglementation de 2007 qui impose d'en décliner les modalités dans des consignes écrites, la pratique des examens visuels se généralise pour les digues depuis la fin des années 1990 où elle a commencé pour les plus grands ouvrages.

Quelle que soit la forme de la surveillance, l'expérience et la compétence des opérateurs sont cruciales pour assurer la pertinence et l'exhaustivité des observations. Il convient d'organiser les équipes de terrain en conséquence pour toutes situations (périodes de congé, crues, ...), y compris dans les cas où du personnel extérieur est mobilisé. A défaut, la qualité de la surveillance s'en ressent.

### Pour les visites initiales et programmées

Lorsqu'il est effectué à sec (ce qui est le cas général), la limite de l'examen visuel initial ou programmé réside dans le fait qu'il ne fournit aucun élément sur les désordres. Ils sont a priori liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du cours d'eau en crue au droit de la digue - qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive ...) ou dont les indices ont été effacés (ex : constructions ou ouvrages enfouis, accidents ou mouvements de terrain remodelés, ancienne zone de surverse, ...). A ce titre, le risque de ne pas être exhaustif est d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne : d'où l'intérêt de compléter les visites de surveillance à sec, dès l'occasion s'en présentant, par des visites en crue et/ou post-crue.

En outre, comme vu précédemment, une végétation non entretenue peut constituer une gêne importante. Certains ouvrages ou parties d'ouvrages ne peuvent pas être examinés sans moyens spéciaux.

En dépit de cela, un examen visuel initial constitue l'étape incontournable d'une étude-diagnostic de digue : elle mérite d'être réalisée avant toute prospection géotechnique dont elle facilitera les modalités de mise en œuvre. Par la suite, des visites de surveillance programmées, plus rapides, permettent de réactualiser l'état des lieux.

### Pour les visites en crue

Les principales limites sont les contraintes de temps et de sécurité qui, souvent, ne vont pas permettre d'effectuer le parcours de l'ensemble du linéaire de la digue. L'efficacité des visites est, en outre, évidemment moindre en conditions nocturnes, alors que les problèmes de sécurité des intervenants sont encore accrus par rapport aux visites de jour. Pour répondre à ces contraintes, une préparation soignée est indispensable, bien avant l'événement de crue lui-même (établissement préalable d'un plan de gestion des ouvrages en crue). De plus, lors de telles visites, le talus côté cours d'eau n'est que partiellement visible, voire totalement immergé.

### Pour les visites post-crue

Les contraintes de temps sont bien plus faibles que pour les visites en crue et la complétude et la pertinence des observations sont meilleures que pour les examens à sec. Il est donc crucial de réaliser ces tournées de surveillance dès lors qu'une crue significative s'est produite. Une préparation soignée reste requise pour gagner en efficacité sur le terrain.

## **6. RENDEMENTS ET COÛTS**

### Visites initiales et programmées

Le rendement de l'examen visuel dépend étroitement des conditions de réalisation : possession, ou non, d'éléments cartographiques de précision et, surtout, état d'entretien de la végétation.

Par ailleurs, le premier examen visuel (reconnaissance initiale) est nécessairement plus long que ceux qui suivent (surveillance programmée) où l'on se limite à mettre à jour les informations.

Dans le cas d'une digue bien entretenue pour laquelle on dispose de plans précis et sans compter le temps de mise au propre des informations au bureau, les chiffres suivants peuvent être avancés :

- reconnaissance visuelle initiale : 1 à 2 km / jour de brigade de deux agents ;
- surveillance programmée : 3 à 5 km / jour de brigade de deux agents.

Lorsque la digue est mal entretenue, les fourchettes ci-dessus peuvent être divisées par deux, voire plus dans les cas extrêmes.

Au final, mises au propre comprises, les coûts au km varient dans une large fourchette de 250 à 1000 euros.

### Visite post-crue

Le rendement global est a priori inférieur à celui d'une visite programmée dans la mesure où la visite post-crue est susceptible de se dérouler à un moment défavorable (période de végétation) et où le nombre d'indices à noter risque d'être beaucoup plus élevé du fait de l'action de la crue.

Sur le terrain, une équipe de trois agents entraînés peut parcourir 3 à 5 km par jour. A ce temps de visite in situ, il faut cependant rajouter celui – au minimum équivalent - de la mise au propre des informations au bureau. Ce travail de mise en forme peut d'ailleurs être différé (mais non abandonné !) dans le souci d'examiner, dans les meilleurs délais après la crue, la totalité du linéaire de digue.

En tout état de cause, le rendement dépend de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible pour son suivi. Le meilleur rendement étant obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés) et grâce à la possession d'un plan à l'échelle du 1/500 ou 1/1000.

## Améliorations technologiques récentes

La mise en œuvre sur les digues de systèmes aéroportés d'acquisition LiDAR à très haute résolution, couplés à l'imagerie aérienne haute définition, est un complément tout-à-fait intéressant aux examens visuels, tout au moins initiaux. Cette technologie commence à se développer en France pour les digues, notamment pour répondre aux besoins de connaissances topographiques sur les ouvrages et leur environnement. Se reporter à la fiche « LiDAR » du présent guide.

Enfin, on citera les innovations intéressantes mises en œuvre par la SNCF pour la saisie d'informations in situ relatives à l'état de leur remblai soumis à des charges hydrauliques. A savoir, l'utilisation d'un boîtier électronique portable multifonctions (GPS, appareil photo numérique et mini-terminal de saisie à l'aide d'un stylet), dans lequel une fiche de saisie des désordres est entrée au format base de données. De tels systèmes, une fois initialisés et pré-remplis, permettent de gagner un temps précieux dans les activités bureautiques, ce qui augmente le rendement global et diminue les coûts.

## **7. CAS DES DIGUES MARITIMES**

A la différence des digues fluviales et en France, les digues de défenses maritimes ne disposent pas encore d'un guide spécifique de recommandations techniques pour leur surveillance.

Cependant, de nombreux principes de la surveillance des digues fluviales peuvent être étendus avec un minimum d'adaptions à la surveillance des digues maritimes. On remplace alors, et selon le cas, la notion de « crue » (et celles de visites en crue et post-crue) par celle de « grande marée » et/ou « de marée à surcote » et/ou de « tempête », voire de « haute mer » (pour les digues partiellement en charge lors de chaque marée haute). De même, le « talus côté cours d'eau » est à remplacer par le talus ou parement côté mer.

Quelques principes ou suggestions pour la pratique des visites d'examen visuel des digues à perré maçonné côté mer ont été posés dans le rapport de la mission post-Xynthia que le Cemagref-Irstea a effectué à la demande du Ministère de l'Ecologie [Poulain, Mériaux, Tourment, Royet, 2010] :

- les visites techniques approfondies (VTA) sous la responsabilité du gestionnaire [...] pourraient être organisées en basse mer en période estivale de grandes marées, par temps calme (ou à la rigueur lors des grandes marées de saison hivernale, mais sous réserve de bénéficier de conditions anticycloniques). Cette situation permet d'observer au mieux, et sans danger, la partie basse des perrés - après qu'ils aient supporté une haute charge hydraulique à la pleine mer – tout en espérant un séchage rapide des zones des perrés maçonnés non sièges de suintements ou écoulements, qui, une fois asséchées en l'absence de précipitations ou

sous l'effet du soleil, se distinguent ainsi des autres. Si le linéaire de digues à examiner est important, il conviendrait d'étendre les opérations de VTA sur plusieurs jours de la même période de grandes marées. Alors, on veillera également à observer les mêmes ouvrages (a minima, le niveau marin maximum atteint) lors de la pleine mer ;

- la surveillance des ouvrages en conditions de tempête est un sujet pour le moins délicat car il n'est évidemment pas question d'exposer le personnel sur les crêtes de digue au cours des tempêtes les plus violentes. En quelques points stratégiques, des réflexions pourraient être engagées sur la pertinence d'installer des systèmes distants de surveillance des digues (caméras, éclairages, ...).

## **8. RÉFÉRENCES**

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, 197 p.

Lino M., Mériaux P., Royet P. (2000) - *Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire Moyenne* ; Cemagref Editions 2000 (ouvrage paru avec l'autorisation de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne), 224 p.

Mériaux P. (2012) in François D., coordinateur (à paraître 2015). *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Guide final du Projet National ERINOH – Thème RECOMMANDATIONS/tome 2, Presse des Ponts.

Maurel P., Mériaux P., Tourment R., Paquier A., Pardo C., Chryat M. (2000) - *Analyse et prototypage d'un S.I.R.S. générique pour aider à la gestion intégrée des zones fluviales endiguées*. Colloque SIRNAT 2000, Grenoble, 28/09/2000.

Poulain D., Mériaux P., Tourment R., Royet P. (2010) – *Dégâts aux digues de défense contre les inondations de la mer dus à la tempête « Xynthia » du 28/02/2010 : rapport de mission et des visites des 6-7 et 18-19 mai 2010*. Rapport (44 p.) pour le compte du MEEDDM-DGPR-STEEGBH.

## **Annexe B**

Fiche détaillée Limnimétrie Sonde de pression



Technique de mesure : **Mesure de niveau d'eau par sonde de pression**

<b>Technique de mesure</b>	<b>Caractéristique mesurée</b>	<b>Mécanismes de défaillance</b>
Sonde de pression	Niveau d'eau	Tous mais en particulier la surverse

## **1. PRINCIPE**

Les sondes de pression sont basées sur une transformation en grandeur électrique de la déformation mécanique d'une membrane élastique (variation d'un champ électrique, d'une conductivité, mesure piézo-électrique).

Au sein d'un tube de protection, la sonde est immergée dans le cours d'eau et mesure la charge hydraulique. Cette charge est dépendante de la hauteur d'eau (pression hydrostatique) mais également de la vitesse d'écoulement. La hauteur d'eau est calculée en faisant une hypothèse sur la vitesse d'écoulement, puisque la vitesse d'écoulement réelle n'est généralement pas connue.

En plaçant le capteur en une position fixe et connue au sein du cours d'eau, la hauteur d'eau au-dessus de la sonde est mesurée en indiquant donc la cote.

## **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

Dans le suivi du risque de **surverse**, deux informations sont naturellement primordiales : la connaissance de la topographie de la digue de protection ainsi que la connaissance du niveau d'eau.

Pour que cette information soit pertinente, la corrélation entre le niveau d'eau mesuré au niveau du cours d'eau et au niveau de la digue doit être parfaitement connue, notamment aux points bas de la ligne de crête. En particulier, lorsque l'ouvrage n'est pas situé immédiatement le long dudit cours d'eau. Cela demande donc un bon retour d'expérience sur des évènements passés et un maintien des capacités hydrauliques des sections endiguées. Contrairement aux capteurs à distance (type radar), les sondes de pression ne peuvent pas être déployées en zone sèche et doivent donc impérativement être installées dans le cours d'eau.

## **3. RAYON D'ACTION**

La mesure est ponctuelle, sa représentativité est donc dépendante du cours d'eau. Une bonne connaissance de la géomorphologie du cours d'eau est nécessaire pour permettre un dimensionnement pertinent d'un réseau de capteurs (espacement entre les points de mesures). Cependant, on peut estimer que cette mesure est réellement représentative au mieux sur quelques kilomètres dans le cas d'un cours d'eau au profil très homogène.



perte de cette protection (endommagement du tube, par exemple) peut amener une variation de la mesure uniquement due à la variation de charge et non pas à une variation du niveau d'eau ;

- Un phénomène d'hystérésis peut se produire (la mesure ne revient pas strictement à l'initiale suite à une montée et descente de niveau d'eau de même amplitude). La dérive créée au fur et à mesure doit être corrigée lors d'un calage périodique (jusqu'à une fois par mois).

## **8. MISE EN ŒUVRE**

Quelle que soit la technologie employée, une sonde de pression doit être placée en un point fixe et protégée de l'écoulement (protection mécanique et vis-à-vis des variations de charge liées à la vitesse d'écoulement et surtout des débris flottants). Les travaux d'installation sont relativement légers et la présence d'un ouvrage d'art facilite d'autant plus la pose en tenant compte des possibles zones de turbulences susceptible de perturber la mesure. Le capteur doit également être positionné dans une zone non sujette à l'encrassement ou à l'envasement.

S'agissant d'un capteur immergé, une sonde de pression et son tube de protection deviennent alors vulnérables en cas de crue, pouvant être facilement endommagés ou arrachés par des débris flottants. La robustesse de la protection mécanique est donc primordiale pour espérer conserver la mesure en période de crue, au moment où elle est particulièrement essentielle.

La très faible consommation de ces capteurs et le mode d'alimentation séquentiel (le capteur n'est alimenté qu'en cas d'acquisition) permettent d'en assurer l'autonomie sur plusieurs mois au minimum, à l'aide de batteries, évitant ainsi de lourds travaux d'amenée des réseaux d'énergie.

Compte tenu de la nécessité de calibrer régulièrement les sondes de pression, elles doivent être installées de manière très accessible.

Enfin, le capteur sera généralement connecté à une unité d'acquisition par voie filaire. Cependant, une liaison radio est parfois mise en œuvre pour éviter des travaux de génie civil trop importants au regard de l'installation.

## **9. INVESTISSEMENT**

Le coût d'une sonde de pression varie selon la technologie employée mais reste toujours faible (quelques centaines d'euros), faisant de ces sondes des consommables. Un tube de protection coûtera également quelques dizaines d'euros selon sa qualité (galvanisé, inox, etc.). S'agissant d'un capteur à sortie classique, outre une centrale d'acquisition (quelques centaines d'euros pour un système d'acquisition simple), l'investissement sera uniquement fonction du nombre de capteurs à déployer et des éventuels travaux de génie civil à prévoir.

## **10. CAS DES DIGUES MARITIMES**

Le suivi instantané du niveau de la mer est beaucoup plus complexe que le suivi limnométrique, du fait de la perturbation haute fréquence de la houle principalement. Il n'est donc pas possible de le suivre de manière pertinente à l'aide d'une sonde de pression, la pression variant en permanence. De plus le niveau moyen de la mer ne permet pas à lui seul d'évaluer les franchissements subis par la digue, qui sont l'une des particularités des digues maritimes.

Il existe cependant différentes techniques robustes et éprouvées de mesure de la houle, dont notamment des houlographes (capteur embarqué dans une bouée). Ceci étant la prévision de la hauteur de houle est généralement difficile : d'abord parce qu'elle est directement dépendantes des conditions météorologiques, elles-mêmes difficilement prévisibles à moyen et long termes, mais aussi parce que la topographie de l'environnement de la digue joue un rôle prépondérant : par exemple un creusement en pied de digue favorisera le développement des vagues. A ce titre un suivi topographique, bathymétrique si l'on se trouve en zone sous-marine, de l'environnement de la digue est essentiel pour espérer anticiper les futures sollicitations de la digue, du point de vue du niveau de la mer et de la puissance de la houle.

Dans une perspective de surveillance continue, l'utilisation de caméras vidéo semble naturelle : la vidéo permet de constater en temps réel l'évolution du niveau marin, l'utilisation de repères visuels permettant de quantifier grossièrement cette évolution. Une technique à distance est d'autant plus nécessaire en contexte marin compte-tenu de la dangerosité, encore accrue par rapport au contexte fluvial, d'intervenir sur le terrain en période de forte sollicitation (grand vent, tempête).

## **11. RÉFÉRENCES**

WATRIN N. (2011), *Les capteurs de mesures du niveau d'eau*, présentation, DREAL Midi-Pyrénées.

## **Annexe C**

Fiche détaillée Limnimétrie Radar



## Technique de mesure : **Mesure de niveau d'eau par radar**

<b>Technique de mesure</b>	<b>Caractéristique mesurée</b>	<b>Mécanismes de défaillance</b>
Radar	Niveau d'eau	Tous mais en particulier la surverse

### **1. PRINCIPE**

La mesure est basée sur le principe du radar : un capteur émet une onde radio qui est réfléchiée par un objet ou une interface, en l'occurrence la surface d'une étendue d'eau, et est enregistrée en retour par le même appareil. Le temps de parcours entre émission et réception est mesuré. La vitesse de l'onde électromagnétique étant connue, la distance parcourue est immédiatement déduite.

En plaçant le capteur en une position fixe et connue au sein du cours d'eau, la hauteur d'eau au-dessus de la sonde est mesurée indiquant donc la cote.



*Capteur de niveau d'eau par mesure radar, (photographie N. Watrin DREAL Midi-Pyrénées).*

### **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

Dans le suivi du risque de surverse, deux informations sont naturellement primordiales : la connaissance de la topographie de la digue de protection ainsi que la connaissance du niveau d'eau.

Pour que cette information soit pertinente, la corrélation entre le niveau d'eau mesuré au niveau du cours d'eau et au niveau de la digue doit être parfaitement connue, notamment aux points bas de la ligne de crête. En particulier, lorsque l'ouvrage n'est pas situé immédiatement le long dudit cours d'eau. Cela demande donc un bon retour d'expérience sur des événements passés et un maintien des capacités hydrauliques des sections endiguées. Contrairement aux capteurs immergés, le capteur radar peut tout à fait être déployé dans une zone habituellement sèche, si cela s'avère pertinent.

### **3. RAYON D'ACTION**

La mesure est ponctuelle, sa représentativité est donc dépendante du cours d'eau. Une bonne connaissance de l'hydraulique du cours d'eau est nécessaire pour permettre un dimensionnement pertinent d'un réseau de capteurs (espacement entre les points de mesures). Cependant, on peut estimer que cette mesure est réellement représentative au mieux sur quelques kilomètres dans le cas d'un cours d'eau au profil très homogène.

### **4. COLLECTE DES DONNÉES / APPLICABILITÉ À LA TÉLÉSURVEILLANCE**

Généralement, le capteur dispose de sorties analogiques classiques, type 4-20mA, et les données peuvent être facilement rapatriées vers un site central distant. La mesure de niveau d'eau par méthode radar peut donc être automatisée et intégrée à un dispositif de télésurveillance. La simplicité de la mesure et sa fiabilité permettent d'envisager des seuils d'alerte sur le dépassement d'un niveau d'eau local.

### **5. TRAITEMENT DES DONNÉES**

Aucun traitement n'est nécessaire, la mesure de niveau d'eau est immédiatement disponible, pour autant que l'on connaisse la cote de pose du capteur.

Bilan technicité requise

	Opérateur	Technicien supérieur	Ingénieur	Expert
Collecte des données				
Traitement				
Interprétation				

### **6. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE**

Depuis plusieurs décennies, le radar est une technologie très bien maîtrisée et exploitée dans de très nombreux domaines à l'échelle industrielle (météorologie, aviation, défense, etc.). La mesure de niveau d'eau découle directement de ces autres applications et bénéficie donc de cette grande maturité.

## **7. FIABILITÉ DE LA MESURE**

Fort du très important retour d'expérience de la technologie radar, l'application à la mesure de niveau d'eau s'avère très fiable et précise (précision typique de  $\pm 2$  mm à  $\pm 5$  mm).

Contrairement à la mesure par émission d'ultrasons, la mesure radar est peu influencée par les variations de température. Elle est donc adaptée à une application en milieu ouvert.

Cependant, deux précautions doivent être respectées :

- tout capteur radar souffre d'une zone « morte » ou « aveugle » dans son environnement immédiat, typiquement quelques dizaines de centimètres. En cas de crue et si le niveau d'eau atteint cette zone aveugle, la mesure est fortement dégradée ou impossible. Certains capteurs sont submersibles. Cependant en cas de forte crue les flottants arracheront très probablement le capteur ;
- la mesure est sensible aux éventuels obstacles situés dans le cône de mesure (5 à 10 ° d'ouverture). Pour des obstacles permanents, une formule de correction peut être apportée.

Par ailleurs, des indicateurs sur la qualité de la mesure peuvent être obtenus :

- Bien que la mesure soit fiable, la précision se dégrade à mesure que la distance surface/capteur augmente. L'utilisation d'un duo capteur radar (niveau d'eau normal et haut) et sonde de pression (niveau bas) est parfois employé pour pallier ce problème.

## **8. MISE EN ŒUVRE**

La mesure étant faite à distance (capteur aérien ou non-immersé), la pérennité du capteur, en période de crue est assurée, pour autant que le capteur soit suffisamment haut par rapport au cours d'eau.

Le capteur doit être placé en zone fixe et parallèlement à la surface d'eau surveillée (donc au-dessus de l'eau et non pas sur la berge). Dans la pratique, il sera donc installé soit sur un support dédié, soit sur un ouvrage de génie civil existant (par exemple sous la voûte d'un pont). Dans ce dernier cas, il faut néanmoins s'assurer que la ligne d'eau ne soit pas modifiée localement. On privilégiera donc les travées longues et on évitera de se placer trop près des piles et culées.



*Capteur radar, installé depuis la berge sur une perche, (photographie N. Watrin DREAL Midi-Pyrénées).*

La très faible consommation de ces capteurs (<1 mA en veille, quelques dizaines de mA en mesure ou en communication) permet d'en assurer l'autonomie sur plusieurs mois au minimum, à l'aide de batteries, évitant ainsi de lourds travaux d'amenée des réseaux d'énergie. Néanmoins, notons que la technologie radar reste plus consommatrice que les sondes de pression (rapport de 5 à 30 environ). Enfin, le capteur sera généralement connecté à une unité d'acquisition par voie filaire. Cependant, une liaison radio est parfois mise en œuvre pour éviter des travaux de génie civil trop importants au regard de l'installation.

## **9. INVESTISSEMENT**

Un capteur radar coûte typiquement de 1000 à 2000 € TTC. S'agissant d'un capteur à sortie classique, outre une centrale d'acquisition (quelques centaines d'euros pour un système d'acquisition simple), l'investissement sera uniquement fonction du nombre de capteurs à déployer et des éventuels travaux de génie civil à prévoir, voir la photographie ci-dessous.



*Capteur radar implanté sur un bâtiment existant. Un escalier d'accès et des protections contre le vandalisme ont été installés (photographie N. Watrin DREAL Midi-Pyrénées).*

## **10. CAS DES DIGUES MARITIMES**

Le suivi instantané du niveau de la mer est beaucoup plus complexe que le suivi limnimétrique, du fait de la perturbation haute fréquence de la houle principalement. Le mouvement permanent et l'irrégularité de la surface de l'eau interdisent toute mesure stable du niveau de la mer. De plus le niveau moyen de la mer ne permet pas à lui seul d'évaluer les franchissements subis par la digue, qui sont l'une des particularités des digues maritimes.

Il existe cependant différentes techniques robustes et éprouvées de mesure de la houle, dont notamment des houlographes (capteur embarqué dans une bouée). Ceci étant la prévision de la hauteur de houle est généralement difficile : d'abord parce qu'elle est directement dépendante des conditions météorologiques, elles-mêmes difficilement prévisibles à moyen et long termes, mais aussi parce que la topographie de l'environnement de la digue joue un rôle prépondérant : par exemple un creusement en pied de digue favorisera le développement des vagues. A ce titre un suivi topographique, bathymétrique si l'on se trouve en zone sous-marine, de l'environnement de la digue est essentiel pour espérer anticiper les futures sollicitations de la digue, du point de vue du niveau de la mer et de la puissance de la houle.

Dans une perspective de surveillance continue, l'utilisation de caméras vidéo semble naturelle : la vidéo permet de constater en temps réel l'évolution du niveau marin, l'utilisation de repères visuels permettant de quantifier grossièrement cette évolution. Une technique à distance est d'autant plus nécessaire en contexte marin compte-tenu de la dangerosité, encore accrue par rapport au contexte fluvial, d'intervenir sur le terrain en période de forte sollicitation (grand vent, tempête).

## **11. RÉFÉRENCES**

WATRIN N. (2011), *Les capteurs de mesures du niveau d'eau*, présentation, DREAL Midi-Pyrénées.

**Annexe D**  
Fiche détaillée Fibre optique



## Technique de mesure : **Fibre optique**

Technique de mesure	Caractéristique mesurée	Mécanismes de défaillance
Fibre optique	Température	Fuites Erosion interne
	Déformation	Glissement de talus Tassement différentiel

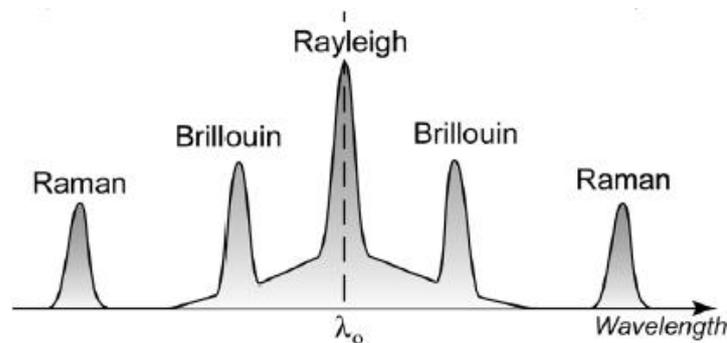
### **1. PRINCIPE**

Depuis 25 ans, les mesures de température par des sondes classiques sont utilisées pour la détection d'écoulements dans le domaine des barrages en remblai. Le principe de la mesure est la détection de l'anomalie thermique provoquée par un écoulement dans le corps de l'ouvrage au moyen de mesures de profils verticaux de température réalisées dans des forages [Dornstädter, 2012].

L'utilisation, plus récente, de la fibre optique permet d'avoir une mesure distribuée de la température [Johansson, 1997] [Fry, 2004] [Védrenne, 2009] et également de la déformation [Meijer, 2008] tout au long de celle-ci. La fibre optique est à la fois capteur et vecteur du signal de mesure. Contrairement aux instruments utilisés classiquement (qui fournissent une information uniquement locale), son utilisation permet d'avoir une vue à la fois globale et détaillée de la zone instrumentée.

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 en cas de grande longueur équipée, un signal lumineux calibré est émis.

Une source laser envoie un signal lumineux de longueur d'onde  $\lambda_0$  qui se propage le long de la fibre optique. Ce signal excite les molécules de la fibre optique qui rétrodiffusent un nouveau signal lumineux dont le spectre, capté par l'analyseur optoélectronique, a la forme suivante :



L'amplitude des raies Raman est très sensible à la température du milieu, tandis que le décalage de longueur d'onde entre  $\lambda_0$  et le pic Brillouin dépend aussi bien de la température que de la déformation de la fibre.

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.

Les interrogateurs optoélectroniques actuellement disponibles sur le marché permettent d'obtenir une mesure de température tous les mètres (voire tous les 0,5 m), avec une portée allant jusqu'à 30 km. Le pas de temps d'acquisition des mesures est d'au moins 10 minutes mais peut être réglé à volonté au-delà de cette limite.

La précision de la mesure de température est de 0,1°C. Cependant, celle-ci se dégrade pour les distances supérieures à 10 km. La précision pour les mesures de déformation est de 0,01% de déformation [Artières, 2011].

## **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

### **2.1 ÉROSION INTERNE**

La mesure de température par fibre optique permet de surveiller les écoulements d'eau qui peuvent être à l'origine de l'érosion interne. Ce n'est donc pas un moyen direct de détection de l'érosion interne. Pour passer de l'identification d'un écoulement d'eau ou de son évolution au diagnostic d'érosion interne, il y a une étape incontournable d'expertise. Cette expertise va prendre en compte non seulement la présence et l'évolution des écoulements d'eau, mais également la géométrie de l'ouvrage (qui va renseigner en particulier sur le gradient hydraulique), sa constitution (qui va renseigner sur la susceptibilité des matériaux à l'érosion interne et la présence éventuelle de filtres), ses points singuliers (en particulier les ouvrages traversants qui constituent des points de fragilité vis-à-vis de l'érosion interne) et enfin les observations issues de l'examen visuel.

Une partie de cette expertise peut être menée « à froid » dans le cadre des démarches de diagnostic et débouchera sur l'identification des fragilités intrinsèques de la digue, pouvant aller jusqu'à l'évaluation de l'ordre de grandeur de la cinétique d'évolution d'un renard à partir de sa formation jusqu'à l'obtention d'une brèche. Ce dernier paramètre renseigne le gestionnaire sur le laps de temps dont il dispose entre la détection d'une érosion interne et son évolution possible vers une rupture de la digue (on parle d'ordres de grandeurs : l'heure, la journée, le mois). Si cette partie de l'expertise est disponible, le gestionnaire pourra alors la prendre en compte dans son plan d'actions en situation d'alerte, en parallèle à l'observation visuelle et à l'analyse des données de température.

### **2.2 TASSEMENT**

La mesure de déformation par fibre optique peut renseigner sur le tassement de la digue pour autant que l'on dispose d'un ou mieux plusieurs points de référence considérés comme fixes. Cependant, l'intégration des données de déformation sur de longues distances perd en précision au fur et à mesure qu'augmente la distance entre les points fixes et, contrairement à d'autres méthodes (topographie classique ou LiDAR), on ne dispose pas encore de recul suffisant pour donner des valeurs de la précision obtenue pour la mesure absolue du tassement.

Par contre, ces mesures de déformation sont suffisantes pour détecter des tassements différentiels avec une précision satisfaisante. Cela permet en particulier de détecter des érosions internes de la digue (en particulier par suffusion), se manifestant par la formation de fontis, ou la formation de karsts en fondation (lorsque la géologie s'y prête), remontant progressivement vers la surface.

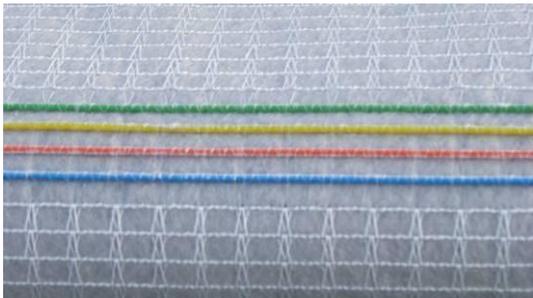
### **2.3 GLISSEMENT DE TALUS**

La mesure de déformation par fibre optique peut renseigner sur l'initiation de glissements de talus ainsi que l'a brillamment démontré l'expérimentation sur le projet IJkDijk aux Pays-Bas. En effet, un glissement en masse du talus est toujours précédé d'une localisation des déformations initiatrices du glissement. Ainsi, sur l'expérimentation IJkDijk où une rupture de digue a été volontairement provoquée par un chargement excessif, les prémices de la rupture ont pu être détectés trois jours auparavant par les mesures de déformation obtenues grâce au réseau de fibres optiques. L'ampleur du glissement à venir a été parfaitement localisée.

## **3. TRAITEMENT DES DONNÉES**

### **3.1 SUIVI DES DÉFORMATIONS**

Pour le suivi des déformations de l'ouvrage, l'appareil de mesure fournit directement les valeurs de la déformation locale, pour autant que la fibre suive bien les déformations de l'ouvrage. Le système GeoDetect<sup>®</sup> développé par TenCate Geosynthetics, qui associe des câbles optiques sur un géotextile, le tout enfoui en tranchée, répond à cette condition. En effet, grâce au frottement avec le sol, le géotextile transmet les mouvements du sol vers le câble optique avec lequel il est liaisonné. Le géotextile offre d'autre part un bon niveau de protection des fibres optiques et la capacité à porter plusieurs lignes optiques (photo 1).



**Photo 1** : Le géotextile (nappe grise) et les câbles optiques (de différentes couleurs) pour la mesure simultanée de la température et de la déformation.

Reste ensuite à passer de la déformation locale au déplacement (tassement si l'on s'intéresse à la composante verticale), ce qui se fait par intégration spatiale des données de déformation, sous réserve bien sûr de disposer d'un ou mieux plusieurs point(s) de référence considéré(s) comme fixe(s).

### 3.2 SURVEILLANCE DES FUITES

La surveillance des fuites est plus complexe car la température n'est qu'un indicateur potentiel de la présence d'un écoulement. La méthode de surveillance repose sur l'écart de température existant entre le massif non exposé à la fuite, où la température est régie par le phénomène de conduction de la chaleur imposée aux limites de l'ouvrage, et la zone de fuite, dont la température est régie par le transport par convection de la chaleur de l'écoulement.

On distingue deux méthodes de mesure de température pour la surveillance des fuites :

- la **méthode passive** consiste à détecter une anomalie de température dans une zone fuyarde par rapport à une zone étanche. Cette méthode pourra rapidement détecter une zone de fuite s'il y a un contraste net de température entre l'eau de fuite et le matériau du remblai. Sinon, ce qui est le cas le plus courant, elle nécessite des chroniques de mesures de plusieurs jours à quelques mois et le recours à des méthodes d'analyse, basées soit sur une approche physico-statistique, soit sur des approches de traitement du signal ;
- la **méthode active** [Perzлмаier, 2004] consiste à chauffer uniformément et pendant quelques heures un câble de cuivre entourant la fibre. Pendant la période de chauffe, l'enregistrement de la température permet de distinguer des comportements traduisant un phénomène dominant de conduction (absence de fuite) ou un phénomène dominant de convection (présence de fuite). Le réseau de fibres optiques peut bien sûr être également utilisé en mode passif (sans chauffe).

Des essais effectués en laboratoire et sur sites expérimentaux ont permis de montrer que le rayon de détection d'une fuite autour de la fibre optique est de 1 à 2 m en employant la méthode passive et de seulement 0,15 à 0,2 m pour la méthode active.

La méthode active est, bien sûr, plus coûteuse à l'installation (système de chauffe avec une puissance de l'ordre de 10 à 15 W/m) mais aussi plus contraignante à l'utilisation (intervenant spécialisé dans le fonctionnement des installations électriques de puissance). A contrario, l'analyse des mesures reste relativement simple. Cette méthode est donc plutôt adaptée à des ouvrages de longueur modérée nécessitant une surveillance renforcée sur une courte période avec une capacité d'anticipation.

La méthode passive est moins onéreuse à l'installation mais nécessite, en règle générale, l'acquisition de données sur des périodes plus longues (y/c des mesures complémentaires de température de l'air environnant et de l'eau à l'amont et dans la nappe) ainsi que le recours à des méthodes d'analyse pointues. Moyennant ces contraintes, cette méthode permet une surveillance du comportement hydraulique à long terme de l'ouvrage mais aussi de générer une alerte en cas d'apparition soudaine d'anomalies potentiellement graves.

#### Bilan technicité requise

	Opérateur			Technicien supérieur			Ingénieur			Expert		
Collecte des données												
Traitement												
Interprétation												

## **4. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE ET RETOURS D'EXPÉRIENCE**

### **4.1 PROJETS DE RECHERCHE DÉVELOPPEMENT**

Plusieurs projets de recherche développement sur l'utilisation de la fibre optique en auscultation des ouvrages hydrauliques en remblai ont été menés dans la dernière décennie, en particulier :

- **Projet PEERINE (France) – Cemagref, EDF, TenCate Geosynthetics**

C'est la première expérimentation en semi-vraie grandeur menée en Europe.

Un premier projet, le projet Hydrodetect [Artières, 2007] qui s'est déroulé de 2004 à 2007, a consisté à simuler des fuites localisées, à travers un remblai homogène en argile de 2,8 m de hauteur et équipé d'une recharge aval en gravier. Un complexe géotextile disposé au contact entre le remblai et la recharge joue un triple rôle de filtre, de drain et de support des fibres optiques (trois lignes). Les principaux résultats de ce projet ont été de régler d'importants aspects métrologiques, de mettre au point le produit GEODETECT, et de montrer qu'avec la méthode passive il est possible de détecter une fuite brutale et localisée aussi faible que 1l/min.

Un second projet, réalisé pour VNF [Royet, 2009] et qui s'est déroulé en 2008-2009, a consisté à simuler des fuites au travers d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane dans différentes configurations de système de drainage, avec les lignes de fibres directement à la base des drains. Plusieurs types de fibre optique ont été testés et les méthodes active et passive ont été utilisées. Ce projet a permis de régler les délicats problèmes techniques liés à la chauffe dans la méthode active. On a montré que même la méthode passive était capable de détecter des fuites ponctuelles jusqu'à des débits de l'ordre de 0,2l/min.

Postérieurement à ces campagnes de mesure, d'importants travaux de recherche, dans le cadre de thèses, ont été menés sur l'interprétation des mesures de température. En particulier pour la détection de fuites à travers le remblai, dans les situations moins idéales où la fuite apparaît progressivement et de façon plus répartie. Cela a donné lieu au développement des modèles IRFA à Irstea [Radzicki, 2010] et MORITO à EDF [Védrenne, 2009] qui modélisent les phénomènes de conduction de la chaleur imposée aux limites de l'ouvrage et de convection de la chaleur de l'écoulement dans la zone de fuite, et/ou qui recourent à des méthodes de traitement du signal de température.

- **Digue de Kembs (France) - EDF, géophyConsult**

La digue de Kembs fait partie de l'aménagement hydro-électrique du Rhin, non loin de Mulhouse. De 13 m de hauteur, elle est constituée de tout-venant sablo-graveleux et son étanchéité est assurée par un masque en amont en béton. Une portion de digue d'environ 1 km de longueur, reconnue pour être le siège de fuites observables visuellement, a été équipée en 2006-2007 de deux lignes de fibres optiques posées dans le contre-canal et en tranchée sous la risberme aval et équipées de systèmes de chauffe. Un tronçon de fibre optique permet par ailleurs la mesure de la température de l'eau du canal. L'analyse des mesures réalisées jusqu'en 2011 et le développement de modèles numériques pour le traitement des mesures ont fait l'objet d'une thèse de doctorat [Cunat, 2012].

- IjkDijk (Pays-Bas) – TNO, STOWA, DELTARES, IDL

Ce projet a eu pour objectif de tester différents moyens de détection de mécanismes de rupture de digues (glissement de talus et érosion interne). Pour cela, des tronçons de digue en vraie grandeur ont été construits, intégrant différents types de capteurs et systèmes de mesure. Et des modèles numériques ont été déployés pour prévoir les modalités de rupture. Ce projet s'est déroulé sur les années 2009 et 2010.

Une première campagne a consisté à provoquer la rupture d'ensemble du talus de la digue en lui appliquant progressivement une surcharge en crête et en creusant une tranchée en pied à l'aval. La fibre optique pour la mesure de déformation figurait parmi les différents équipements de détection mis en place. Quatre lignes horizontales de fibres optiques avaient été installées, depuis le haut du talus jusqu'au pied de digue. Ce dispositif de mesure s'est avéré apte à détecter le glissement et à en prévoir la géométrie 2,5 jours avant l'occurrence de la rupture.

Une seconde campagne a consisté à provoquer la rupture par érosion interne à la base de la digue en augmentant progressivement le gradient hydraulique. La fibre optique pour la mesure de température figurait parmi les différents équipements de détection mis en place. Quatre lignes horizontales de fibres optiques avaient été installées sous la digue au contact avec la fondation, de l'amont à l'aval. Ce dispositif de mesure s'est avéré apte à détecter la cinétique des fuites et à localiser l'endroit du développement de l'érosion 2 jours avant l'occurrence de la rupture.

Ce projet de R&D a fourni des résultats prometteurs et a montré l'efficacité technique du dispositif. Sa mise en œuvre sur ouvrage réel paraît tout-à-fait envisageable, moyennant des adaptations. Les contraintes de coût nécessiteront toutefois de cibler les tronçons d'ouvrage à équiper, en fonction de leur pathologie avérée ou potentielle.

#### **4.1.1 INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES**

Il s'agit d'installations à vocation d'usage industriel à terme, mais avec une forte dimension de démonstration et de validation des projets de R&D mentionnés ci-dessus. On en citera trois, dont seules les deux dernières concernent des digues à charge temporaire (digue fluviale ou estuarienne de protection) :

- Expérimentation d'Oraison (France) - EDF [Khan, 2010]

Un dispositif de mesure de température par fibre optique a été installé en 2005 sur un tronçon de canal hydroélectrique dans le sud de la France, à des fins d'expérimentation en vraie grandeur et de validation des modèles d'analyse des mesures de température développés alors par EDF. Le canal est formé d'une ou deux digues latérales selon la topographie et dispose d'une étanchéité par masque en béton, en fond et sur les berges du canal. Le tronçon de 2,2 km de longueur a été équipé d'une ligne de fibres optiques positionnée à environ 1 m de profondeur dans une tranchée en pied extérieur de digue. Des fuites artificielles ont été créées en trois points du canal, avec des débits dans la gamme de 1 à 5l/min. L'expérimentation a permis de montrer qu'avec les modèles adéquats d'analyse des mesures de température, il était possible de détecter non seulement les fuites provoquées, mais aussi d'autres fuites préexistantes sur le canal.

- Digue de Loire en Val d'Authion (France) – DREAL Centre, TenCate Geosynthetics, dans le cadre du projet RGCU HydroDetect

Un dispositif de mesure de température par fibre optique a été installé en octobre 2007 dans le cadre de travaux de confortement de la digue d'Authion par mise en place d'une recharge à l'aval drainante. L'équipement a concerné un tronçon d'une longueur de 840 m, où la digue mesure entre 4 et 6 m de hauteur. Trois lignes de fibres optiques ont été installées sur la couche filtrante qui délimite le remblai existant et la recharge, respectivement en haut, à mi-hauteur et en pied de talus [Artières, 2011].



**Photo 2** : vue du talus aval avec le géotextile filtre et les trois lignes de fibres protégées par des bandes de géotextile.

- Digue d'estuaire à Boston (UK) - Environment Agency, TenCate Geosynthetics, dans le cadre du projet européen UrbanFlood [Simm, 2012]

L'objectif est de renforcer la surveillance d'un tronçon de digue en terre présentant des signes d'instabilité. Cette digue, en zone urbaine d'estuaire, est soumise à un fort marnage (jusqu'à 6 m d'amplitude). Ce tronçon de 300 m de longueur a été choisi comme site de démonstration de technologies d'auscultation dans le cadre du projet européen UrbanFlood. Le composite géosynthétique / fibres optiques, conditionné en rouleau de 0,76 m de largeur et 600 m de longueur, a été déroulé en continu sur deux niveaux du talus et placé en tranchée peu profonde (0,2 à 0,3 m) afin de ne pas provoquer d'instabilité. L'instrumentation est placée dans un local de l'écluse située à proximité. L'interrogateur optoélectronique utilise l'effet Brillouin pour mesurer les déformations tous les mètres de longueur de la fibre.

La mise en œuvre a été réalisée début 2011 pour un coût de 25 k€ incluant fourniture des capteurs, travaux de terrassement et installation, mais non compris les études de conception et l'appareil optoélectronique. Une première série de mesures a été acquise en continu sur 2 mois avec une solution de location de l'appareil optoélectronique et du modem de télétransmission des données.

## **4.2 INSTALLATIONS INDUSTRIELLES SUR DES DIGUES**

A notre connaissance, deux sont actuellement en projet :

- Digue rive gauche du Rhin, biefs de Gamsheim et Iffezheim [Courivaud, 2012].

Le projet concerne la digue rive gauche de canalisation du Rhin, gérée par VNF et qui supporte une charge hydraulique permanente. Le tronçon concerné par le projet a une longueur de 38 km. La première étape du projet, confiée à un groupement SAFEGE, geophyConsult et EDF, a consisté à réaliser un diagnostic de sécurité de la digue. La seconde étape a porté sur la conception du dispositif de surveillance et d'auscultation. Ce dispositif comportera, aux côtés de choses classiques comme l'examen visuel, des mesures topographiques et piézométriques, une auscultation par fibres optiques pour la mesure de température par méthode passive. Le nombre de lignes de fibres et leur positionnement ont fait l'objet d'études approfondies, sur la base de modélisations thermo-mécaniques aux éléments finis. Au final, il est prévu une ligne de fibres optiques installée en tranchée au pied aval de la digue, à 1,0 m à 1,5 m de profondeur. Le coût prévisionnel de cette installation est estimé à 2,6 M€, incluant le génie civil et la fourniture et installation des équipements.

- Dignes du Rhône entre Beaucaire et Arles, [Mériaux, 2012].

Dans le cadre du « Plan Rhône », le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM), responsable d'un parc de 230 km de digues fluviales et maritimes de protection contre les inondations, a établi un programme de sécurisation des ouvrages qui prévoit sur les tronçons entre Beaucaire et Arles :

- l'aménagement de deux tronçons de digue résistant à la surverse d'une longueur développée de 5 km respectivement sur chaque rive, calés en altimétrie pour éviter tous débordements pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (période de retour d'environ 100 ans) ;

- l'aménagement, en amont et en aval de ces tronçons résistants à la surverse, de tronçons de digues calés 50 cm au-dessus du niveau atteint par la crue millénaire du Rhône.

Le mode d'auscultation retenu par le SYMADREM sur ce linéaire de 25 km d'ouvrages est continu. Il sera assuré par mesures de températures et de déformation à base de fibre optique. L'objectif est de détecter de façon précoce l'apparition de fuites dans les ouvrages et surtout d'érosion interne. Le dispositif qui est en cours de conception devra permettre d'établir des mesures dans le temps et dans l'espace suffisamment rapprochées pour disposer d'une mesure quasiment continue. Ce dispositif dans des digues sèches (mise en eau pour les crues de périodes de retour comprises entre 3 et 5 ans) devra être durable dans le temps (durée de vie 100 ans) et surtout opérationnel le jour J. Il sera donc complété par une assistance technique pour la maintenance du dispositif et son exploitation en périodes de crues. Ce qui imposera une certaine réactivité de la part du prestataire et des garanties permettant d'assurer une astreinte pendant la période de maintenance et d'exploitation du dispositif (a priori 10 ans). La transmission des données au poste de commandement de la surveillance des ouvrages en périodes de crues sera effectuée via un système radio-numérique en cours de mise en œuvre.

Un premier tronçon de digue rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques sera équipé sur 13 km de fibre optique, dès 2013. C'est dans le remblai drainé côté val que sera installé le dispositif de fibre optique (trois bandes à différentes hauteurs). Le montant total des travaux est estimé à 33 millions d'€uros HT et le montant du dispositif d'auscultation à 300 k€ HT, soit environ 1% du montant de l'investissement.

## **5. RÉFÉRENCES**

Artières & al., 2007. *HYDRODETECT – Rapport final*, décembre 2007, 38 p. et annexes

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.

Courivaud J.-R., Fry J.-J., Pinettes P., Cassard A., Miceli J., Artières O., 2012. *Systèmes d'auscultation de digues basés sur des mesures de température et de déformation par fibre optique*. Colloque CFBR « auscultation des barrages et des Digues - Pratiques et perspectives », Chambéry, novembre 2012.

Cunat P., 2012. *Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures répartie, mesurées par fibre optique*, Rapport de thèse, Université de Grenoble, 247p.

Dornstädter J., Heinemann B., 2012. *Temperature as Tracer for In situ Detection for Internal Erosion*. Proc of the International Conference on Scour and Erosion-6, Paris, 27-31 août 2012, pp. 199-205.

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, 25 et 26 nov. 2004.

- Johansson S. (1997). *Seepage monitoring in Embankment Dams*. PhD Rapport, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Khan A. A., Cunat P., Beck Y. L., Mars J. I., Vrabie P. and Fabre J. P., 2010. *Distributed fiber optic temperature sensors for leakage detection in hydraulic structures*, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo.
- Meijer & al., 2008. *The development of an early warning system for dike failure*, Waterside security conference, Copenhagen.
- Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma-Lopes S., Maurin J., Pinhas M., 2012. *L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer*. Colloque CFBR « auscultation des barrages et des Dignes - Pratiques et perspectives », Chambéry, novembre 2012.
- Perzmaier S., Aufleger M., Conrad M., 2004. *Distributed Fiber Optic Temperature Measurements in Hydraulic Engineering. Prospects of the Heat-up Method*. ICOLD annual meeting, Seoul.
- Radzicki K., Bonelli S., 2010. *A Possibility to Identify Piping Erosion in Earth Hydraulic Works Using Thermal Monitoring*. Proc. of 8th ICOLD European Club Symposium, Innsbruck, pp 618-623.
- Royet P. & al., 2009. *Étanchéité par géomembrane et détection de fuites par fibres optiques ; Expérimentations sur la plateforme PEERINE – Rapport final*, juillet 2009, 28 p.
- Simm J., Jordan D., Topple A., Mokhov I., Pyayt A., Abdoun T. & Bennett V., Broekhuijsen J. & Meijer R., 2012. *Interpreting sensor measurements in dikes - experiences from UrbanFlood pilot sites*. Proc. of the FLOODrisk 2012 conference, Rotterdam, 20-22 November 2012, Rotterdam, The Netherlands. To be published.
- 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, juin 2009.

## **Annexe E**

Fiche détaillée Imagerie thermique



## Technique de mesure : **Imagerie thermique**

<b>Technique de mesure</b>	<b>Caractéristique mesurée</b>	<b>Mécanismes de défaillance</b>
Imagerie thermique	Température	Érosion interne

### **1. PRINCIPE**

L'imagerie thermique, comme son nom l'indique, cherche à mesurer et à rendre une image de la température émise par un objet donné. Son principe est basé sur le rayonnement infrarouge, lui-même lié à la « chaleur » de l'objet. En effet, à température ambiante ordinaire, tout corps émet un rayonnement électromagnétique dans la gamme des infrarouges, c'est-à-dire dans des longueurs d'ondes supérieures au spectre du visible pour l'œil humain (0,78 à 1000  $\mu\text{m}$ ). L'intensité de ce rayonnement est essentiellement fonction de la température du corps en question et de son émissivité, plus précisément il s'agit de sa capacité à réémettre l'énergie absorbée. L'émissivité dépend entre autres de la nature dudit corps et notamment de sa surface.

En mesurant précisément l'énergie émise dans le rayonnement infrarouge 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.

L'imagerie thermique est également appelée « imagerie infrarouge » ou « thermométrie ». La mesure est réalisée par une caméra thermique ou caméra infrarouge.

### **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

L'imagerie thermique permet de dresser une carte de la température d'un objet, quelle que soit son étendue. Il est donc possible de réaliser une image thermique d'une digue et d'en déduire précisément la température à sa surface. En particulier, une température singulière en un point de la digue peut être identifiée par l'imagerie thermique.

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 et/ou suffisamment superficielle, un gradient thermique atteint la surface de la digue et est donc susceptible d'être identifié par imagerie thermique. Ainsi, une fuite susceptible de provoquer l'érosion interne de la digue peut être identifiée au moment de la crue.



*Exemple d'imagerie thermique : une digue (verte), sur laquelle des arbres ont été plantés (rouge), protège une route (crème) de l'eau d'un canal. Une fuite, plus froide, apparaît clairement en bleu, l'eau s'écoulant jusque sur la route. D'après Morawetz, 2007.*

### **3. RAYON D'ACTION**

Strictelement, la mesure ne caractérise que la surface de digue visée. De plus, pour qu'une fuite d'eau soit détectée, il faut qu'elle soit suffisamment importante (débit), proche de la surface ou que la différence de température entre le corps de digue et l'eau soit suffisamment grande pour générer une variation de température notable en surface. La profondeur investiguée n'est pas totalement déterminée. Il est également nécessaire que la digue soit bien entretenue, avec une couverture herbacée rase, car une couverture végétale haute ou, pire, une couverture arbustive, rend la méthode inopérante.

### **4. COLLECTE DES DONNÉES / APPLICABILITÉ À LA TÉLÉSURVEILLANCE**

La mesure peut être réalisée à différentes échelles :

- Mesure macroscopique et à haut rendement en équipant une caméra thermique sur un drone ou un hélicoptère. En survolant la digue, une mesure peut être réalisée sur tout le long du linéaire ;
- Mesure locale en auscultant la digue à l'aide d'une caméra « de poing ». Le rendement est probablement moins optimal que dans le cas d'une caméra aéroportée. Cependant, la distance rapprochée augmente la résolution de la mesure (davantage de points d'acquisition pour une même surface).

Par conséquent, la thermométrie par caméra thermique est à ce jour très peu adaptée à la télésurveillance et encore moins à une télésurveillance continue.

## 5. TRAITEMENT DES DONNÉES

La mesure de température est obtenue en temps réel, sans aucun traitement. Le principal paramètre d'ajustement est l'émissivité du matériau visé si l'on souhaite connaître précisément la température absolue de la digue. Pour une étude relative de la température, suffisante pour détecter une anomalie – une fuite-, un contrôle fin de ce paramètre n'est pas strictement nécessaire.

Cependant, l'objectif n'étant pas de mesurer la température de la digue mais d'identifier un phénomène d'écoulement, il est nécessaire de pouvoir relier des éventuelles singularités de température avec la réalité du terrain. En effet, différents éléments peuvent provoquer une singularité de température à la surface d'une digue, et notamment la végétation (cf. section fiabilité de mesure). Une comparaison avec le terrain est donc souhaitable dans tous les cas :

- Dans le cadre d'une investigation *in situ*, avec une caméra de poing, la comparaison avec le terrain est immédiate, toute singularité de mesure étant investiguée. L'imagerie thermique prend alors un rôle d'aide à l'examen visuel, permettant à la fois d'optimiser la recherche d'éventuelles fuites, tant en termes de temps que d'efficacité, ce qui s'avère particulièrement utile en période de crue ;
- Dans le cas d'une mesure aéroportée, une comparaison avec des photographies aériennes du terrain est fortement recommandée pour permettre d'expliquer certaines mesures. Notamment si une singularité est provoquée par une végétation importante.

Bilan technicité requise

	Opérateur		Technicien supérieur		Ingénieur		Expert	
Collecte des données								
Traitement								
Interprétation								



*Exemple de mesure aéroportée. Une fuite dans un canal est clairement identifiée (côté droit) et confirmée sur le terrain, d'après Huang, 2002.*

## **6. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE**

Dès les années 1950, la thermométrie est une technologie développée très largement utilisée : sécurité, isolation, vieillissement d'appareillages, etc. La technologie peut tout à fait être considérée comme mature.

Pour autant, l'application à la détection de fuites en digue, quant à elle, est encore au stade de recherche et développement. Dans un domaine proche, davantage de travaux ont été menés jusqu'à aujourd'hui sur l'étude des fuites des canaux d'irrigation ou de canaux d'aménagements hydroélectriques. Ainsi dès 1994, EDF a mis en œuvre cette technique (par hélicoptère) sur une longueur cumulée de 108 km sur les digues du Rhin et a pu détecter des fuites débouchant dans le contre-canal. A cette même période, la technique a été employée avec succès au barrage de Lavaud-Gélade pour détecter les zones humides sur le parement aval [CFGB, 1997]. Le retour d'expérience acquis s'applique en partie aux digues en période de crue. Néanmoins, les actions de recherche spécifiques à ce domaine d'application restent à réaliser.

## **7. FIABILITÉ DE LA MESURE**

Fort du grand retour d'expérience de la technologie, la stricte mesure de température est relativement précise, pour autant l'émissivité de l'objet étudié soit bien connue. Une précision absolue de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  peut être envisagée. La précision relative est meilleure et permet de distinguer des variations de température de l'ordre de  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Comme explicité au paragraphe précédent, la fiabilité de la détection d'une fuite n'est pas uniquement fonction de la capacité à détecter une variation de température. En effet, l'hétérogénéité des objets dans le champ de visée implique nécessairement des émissivités différentes et peut mener à des singularités artificielles de mesure. La présence de végétation dense peut particulièrement soulever des difficultés puisque le rayonnement mesuré sera celui des feuilles ou de la canopée et non pas celui du sol.

Dans le cas d'une mesure macroscopique, une correction des mesures peut être réalisée à l'aide d'une comparaison avec des photographies aériennes, afin d'affecter une émissivité spécifique aux différents types de surfaces étudiées (béton, terre, végétation rase, etc.). Cependant, ce type de correction ne peut prétendre à éliminer totalement les artefacts provoqués par les singularités du terrain. Une confirmation visuelle des phénomènes détectés par la caméra sera donc nécessaire.

Les conditions environnementales influent également sur la qualité des mesures. En particulier, la pluie et le ruissellement dégradent la qualité de la mesure, ajoutant un bruit important. Ceci présente un inconvénient majeur puisqu'une période de crue peut justement être provoquée par une période de fortes pluies.

A contrario, un fort rayonnement solaire facilitera la détection de fuite au sein d'une digue. Les terrains autour de la fuite étant davantage humides, le réchauffement des terrains en début de journée sera moins marqué autour de la fuite. De la même manière, le refroidissement en fin de journée sera plus long, permettant ainsi une détection plus simple.

Enfin, dans le cas d'une mesure à la caméra de poing, le rayonnement de l'utilisateur est également susceptible d'influencer les mesures.

## **8. MISE EN ŒUVRE**

La mise en œuvre de la thermométrie infrarouge dépend essentiellement des moyens dont dispose l'exploitant, chacun des deux modes d'exploitation nécessitant la mobilisation d'opérateurs.

Dans le cas d'un examen visuel assisté par caméra thermique, aucune ressource supplémentaire n'est nécessaire par rapport à un examen classique. L'utilisation de l'appareil est intuitive, tout comme la lecture des mesures. La thermométrie ne ralentit pas profondément le rythme de l'examen visuel et, au contraire, permet de focaliser l'attention là où elle est nécessaire. Cependant, cette méthode exige une présence sur le terrain en période de crue.

Dans le cas de mesures aéroportées (ou utilisation de drones), l'indisponibilité d'engins adaptés en période de crue imprévisible peut s'avérer problématique.

Si la surveillance en période de crue peut s'avérer délicate, le diagnostic post-crue de la digue demeure un cas d'application particulièrement intéressant.

Contrairement aux mesures en place, pour lesquelles la position des capteurs est bien connue, un effort particulier doit être porté au géo-référencement des mesures faites par caméra de poing ou par caméra aéroportée. L'utilisation d'un SIG est évidemment recommandée pour permettre l'exploitation des mesures *a posteriori*.

## **9. INVESTISSEMENT**

Le coût d'une caméra thermique de poing est de l'ordre de 5 à 10 k€. Un modèle aéroporté pourra présenter un coût plus élevé auquel, le coût de location de l'aéronef est évidemment à ajouter.

## **10. CAS DES DIGUES MARITIMES**

L'imagerie thermique présente essentiellement un intérêt lorsque la digue est sollicitée puisqu'elle cherche à détecter les intrusions d'eau en son sein. Dans le cas d'une digue maritime la sollicitation de la digue se traduit d'une part par une élévation du niveau de la mer mais également par de la houle et potentiellement des franchissements. Il semble donc tout à fait exclu de pouvoir différencier les anomalies thermiques provoquées par une présence anormale d'eau au sein de la digue et celles par la simple présence d'eau en surface du fait de la houle et des franchissements.

## **11. RÉFÉRENCES**

Bastiaanssen W. (2000), *Remote sensing for irrigated agriculture : examples from research and possible applications*, Agricultural water management, Vol 46, 137-155.

Huang Y. (2010), *Airborne remote sensing for detection of irrigation canal leakage*, Irrigation and drainage, Vol 59, N°5, 524-534.

Huang Y. (2002), *Thermal imaging of canals for remote detection of leaks: evaluation in the united irrigation district*. Technical report, Texas Water Resources Institute.

Morawetz R. (2007), *Dike investigations using geophysical methods – techniques for the future ?*, Flood risk management in Europe, Ed. Springer.

Nellis D. (1982), *Application of thermal infrared imagery to canal leakage detection*, Remote sensing of environment, Vol 12, 229-234.

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.

*Projet ANR ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques (ERINOH)*, IRSTEA, Cerège, EDF (CIH), GeM, LCPC, LMPG (Univ. du Havre), LPMC (Univ. De Paris 6), Sobesol, Univ J. Fourier Grenoble.

CFGB, 1997. *Érosion interne : typologie, détection et réparation*. Barrages et réservoirs, n°6, mai 1997, 126p.

## **Annexe F**

Fiche détaillée Panneaux électriques



## Technique de mesure : **Panneaux électriques**

<b>Technique de mesure</b>	<b>Caractéristique mesurée</b>	<b>Mécanismes de défaillance</b>
Panneaux électriques	Résistivité électrique	Érosion interne

### **1. PRINCIPE**

La méthode cherche à distinguer les différents faciès du sol en les discriminant par leur résistivité. La résistivité est à la fois fonction de la nature du sol mais aussi de sa saturation en eau.

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 est mesuré en parallèle par deux autres électrodes, également placées dans le sol. La résistivité électrique apparente du sol est fonction à la fois du courant injecté mais également d'un facteur dit géométrique dépendant directement de l'implantation des 4 électrodes.

A ce titre, plusieurs types de dispositifs (c'est-à-dire agencements d'électrodes) sont exploités, présentant chacun des caractéristiques propres de sensibilité aux variations verticales/horizontales, de volume ausculté, de profondeur de pénétration, etc. Le choix se fera donc selon la structure à ausculter et le matériel employé. Cependant, les dispositifs Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle et pôle-pôle sont les plus couramment employés.

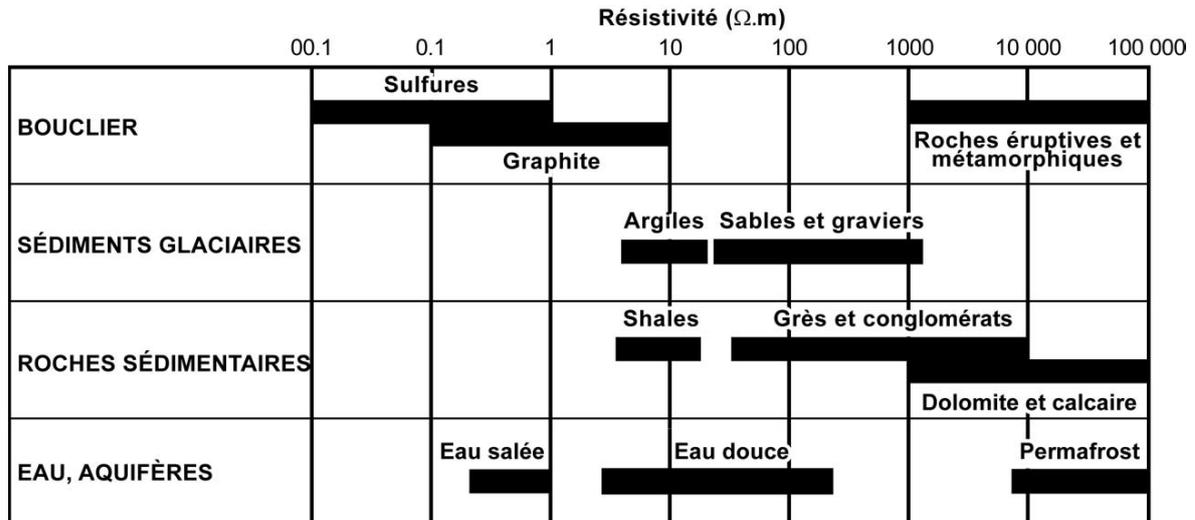
En exploitant une unique implantation et configuration d'électrodes, on obtient une mesure de résistivité caractérisant un volume de sol situé entre les électrodes de mesure. Malheureusement, la profondeur d'investigation dépend directement de la résistivité du sol et n'est donc pas connue *a priori*.

La tomographie de résistivité électrique devient particulièrement intéressante lorsqu'elle est déployée sous forme dite de « panneaux électriques ». Un grand nombre d'électrodes est déployé à l'aplomb de la zone d'étude, typiquement le long d'une ou plusieurs lignes. Ces sondes sont sollicitées tour à tour en tant qu'électrode d'injection ou de mesure, et ce dans un grand nombre de configurations, permettant ainsi de faire varier à la fois la zone et la profondeur de mesure. Ainsi, les volumes étudiés se répartissent sur toute la zone instrumentée. Le résultat obtenu est une carte de résistivité apparente (pseudo-section) en fonction de la position de mesure et de la longueur du dispositif.

Après traitement, une carte de résistivité inversée est obtenue, dessinant un profil de la résistivité de la zone d'étude. Cette mesure de la résistivité va permettre de distinguer les différents « faciès » ou éléments constitutifs de la digue – pour autant que leur résistivité soit différente : sols de nature différentes, zone de saturation singulière, éléments ponctuels (canalisation, cavité, etc.). La profondeur d'investigation étant fonction de la résistivité du sol étudié, il est impossible de savoir avec certitude à quelle profondeur se trouvent les éléments caractérisés (la profondeur typiquement caractérisée est cependant connue et égale à environ un huitième de la longueur du dispositif). Cependant, la structure géotechnique de la digue est parfois connue.

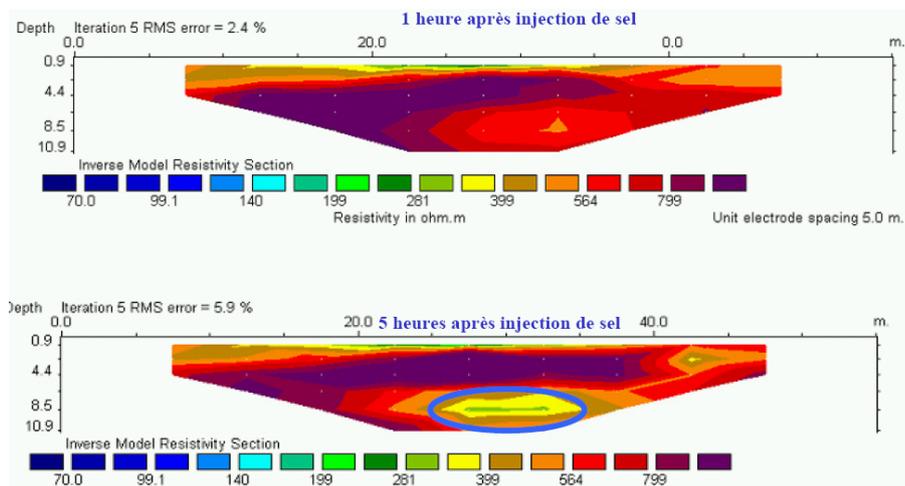
## 2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS

La résistivité d'un sol est fonction de sa nature ainsi que de son degré de saturation.



Gamme des valeurs de résistivité électrique pour différents matériaux géologiques (Marescot, 2006)

Ainsi, tout changement dans la constitution de la digue influence, de manière plus ou moins importante, la valeur de la résistivité locale. Ainsi, l'érosion interne d'une digue, c'est-à-dire une modification des matériaux de la digue par un transport hydraulique de particules, est susceptible de faire évoluer la résistivité électrique. Un suivi continu, ou tout du moins régulier, des valeurs de résistivité d'un tronçon de digue est donc susceptible de mettre en évidence une érosion interne de la digue.



Pseudo-sections de résistivité électrique d'une digue 1h et 5h après l'injection de saumure dans une fuite identifiée, d'après Blais, 2010.

Déployée en reconnaissance dans le cadre d'un diagnostic, la méthode permet aussi de détecter des hétérogénéités dans le remblai ou sa fondation (ex : couches ou zones perméables, conduits métalliques localisés, ...), sources potentielles d'érosion interne. Par contre, si la digue ou sa fondation englobe un important composant métallique (ex : un rideau de palplanches), les mesures de tomographie électrique sont complètement bruitées et inexploitable

### **3. RAYON D'ACTION**

#### **3.1 PROFONDEUR**

La profondeur maximale investiguée est en partie dépendante de la résistivité des terrains (plus la résistivité est importante, plus les mesures resteront superficielles). Cette profondeur est néanmoins proche d'un 6<sup>ème</sup> à un 8<sup>ème</sup> de la taille du dispositif, il devra donc être dimensionné pour permettre d'investiguer jusqu'à la profondeur souhaitée (pied de digue au minimum, idéalement les premiers mètres de fondation seront inclus).

#### **3.2 LINÉAIRE**

La méthode des panneaux électriques permet de réaliser un profil 2D de la résistivité dans le plan vertical formé par une ligne d'électrodes. L'utilisation de plusieurs lignes permet de réaliser des interpolations 3D, bien que l'inversion de mesures en trois dimensions soit encore aujourd'hui un exercice délicat. Le rayon d'action de la méthode le long d'une digue est donc directement dépendant de la taille du dispositif et donc de deux paramètres : le nombre d'électrodes mises en œuvre et leur écartement.

Tout d'abord, l'écartement entre deux électrodes influe sur la profondeur investiguée et sur la résolution spatiale de l'image de résistivité obtenue. On ne pourra donc pas éloigner les électrodes indéfiniment sans risquer de dégrader fortement la représentativité des mesures. Une maille de 2 mètres peut être considérée comme un écart maximal acceptable pour réaliser des mesures de qualité sur une digue et les premiers mètres de fondation.

Concernant le nombre d'électrodes mises en jeu, il n'y a pas de limite théorique maximale. Une unique unité d'acquisition est susceptible d'interroger tour à tour différentes configurations d'électrodes (principe même des panneaux électriques), une augmentation du nombre d'électrodes impliquant uniquement l'utilisation de multiplexeurs adaptés. La profondeur d'investigation étant fonction de l'écartement des électrodes, pour une digue donnée, il n'est pas pertinent de profiter d'un agrandissement d'un dispositif correctement dimensionné à l'origine pour exploiter des configurations d'électrodes plus éloignées. Ainsi, au-delà d'une taille critique, le nombre de configurations à exploiter sera sensiblement proportionnel à la longueur du dispositif. Il en découle que le temps de calcul évoluera également de manière plus ou moins proportionnelle à la longueur du dispositif. Dans ces conditions, seuls le temps de calcul, la distance électrodes-unité d'acquisition et naturellement le coût limiteront effectivement le linéaire susceptible d'être suivi. Une instrumentation sur plusieurs centaines de mètres est donc tout à fait envisageable.

## **4. COLLECTE DES DONNÉES / APPLICABILITÉ À LA TÉLÉSURVEILLANCE**

Pour caractériser au mieux un tronçon de digue à partir d'un réseau d'électrodes, les paramètres d'acquisition (dont notamment la programmation des nombreuses configurations de mesures) doivent être soigneusement étudiés et adaptés à l'environnement. Une fois ces paramètres établis, ceux-ci doivent être rigoureusement conservés pour permettre la comparaison des futures mesures. Ceci permet d'automatiser les acquisitions.

Le système est essentiellement constitué d'une unité d'acquisition, d'un résistivimètre et des électrodes reliées par câble. La consommation de l'ensemble est relativement importante et nécessite une source d'énergie adaptée (réseau électrique/panneaux solaires).

Les données de mesure brutes obtenues (constituant la pseudo-section de résistivité) sont peu volumineuses et peuvent facilement être rapatriées vers un site central distant.

## **5. TRAITEMENT DES DONNÉES**

Le traitement des données consiste essentiellement en l'inversion de la pseudo-section. Différents logiciels permettent de réaliser cette inversion très rapidement (5 minutes à quelques dizaines de minutes typiquement), l'un des plus couramment utilisés étant Res2DInv (Loke, 1997). Bien que le traitement des données soit relativement simple, leur interprétation reste une affaire de spécialiste et demande à la fois une bonne connaissance de la méthode mais aussi du terrain et de ses caractéristiques. La présence d'éléments conducteurs (réseaux, etc.) dans le champ de la mesure complique encore davantage l'interprétation. Il ne s'agit donc pas d'une méthode aisée à mettre en œuvre spontanément.

L'interprétation des mesures pourra être facilitée par l'apport de mesures complémentaires. On peut citer notamment les mesures de niveau d'eau en fleuve, le niveau de nappe, la teneur en eau dans la digue et la température.

Bilan technicité requise

	Opérateur	Technicien supérieur	Ingénieur		Expert
Collecte des données					
Traitement					
Interprétation					

## **6. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE**

Exploitée depuis moins de 20 ans et à petite échelle, la mesure de résistivité électrique pour caractériser un terrain est une technologie relativement récente. En particulier, l'application à une surveillance continue (dispositif laissé en place) est aujourd'hui au stade de recherche et développement.

## **7. FIABILITÉ DE LA MESURE**

Bien que la mesure de résistivité soit elle-même une mesure fiable, l'interprétation de la carte de résistivité inversée est un exercice délicat pour plusieurs raisons :

- La profondeur investiguée n'est pas parfaitement connue, puisqu'elle est par nature dépendante de la résistivité des terrains. Ainsi, la profondeur obtenue par inversion de la pseudo-section n'est qu'indicative. Seule une investigation *in situ*, type géotechnique, permettrait de recalibrer la profondeur dans l'absolu ;
- Des objets très différents peuvent induire une résistivité similaire qu'il est impossible de discerner (principe de similitude ou d'équivalence). Des hétérogénéités petites et superficielles peuvent masquer des hétérogénéités plus grandes et en profondeur.

Cependant, ces difficultés peuvent être en partie écartées par un suivi continu et donc par une comparaison relative des mesures. En effet, même si l'état initial n'est pas parfaitement connu, une évolution des mesures de résistivité sera repérable, pour autant que les paramètres d'acquisition et de traitement soient strictement conservés d'une mesure à l'autre.

A ce titre, la stabilité des conditions de mesure a été validée sur 2 ans par IFSTTAR dans un contexte de digue [Palma-Lopes 2010, Mériaux et al. 2012] mais également sur une dizaine d'années dans un milieu plus « agressif » (plage maritime). La robustesse dans le temps de ces dispositifs vient notamment de la grande simplicité des capteurs, puisqu'il ne s'agit que d'électrodes. Par nature plus sensible, l'électronique est-elle protégée au sein de l'unité d'acquisition.

Par ailleurs, la comparaison de différents états de résistivité dans le temps d'une digue sera d'autant plus fine que l'on considérera une inversion des différences de mesures et non pas une différence d'inversions de mesure.

Néanmoins, il convient de noter que l'évolution saisonnière des conditions environnementales (température, humidité) influence la résistivité et sera perçue dans les mesures continues.

## **8. MISE EN ŒUVRE**

Le dispositif est constitué essentiellement par le réseau d'électrodes à mettre en terre en crête de digue. Chaque électrode est reliée par câble à une unique unité d'acquisition dotée d'un résistivimètre. Les électrodes ne nécessitent aucune protection ou conditionnement particulier.

## **9. INVESTISSEMENT**

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 ne présentent pas de difficultés particulières et seront relativement simples à mettre en œuvre sur une digue préexistante.



*Travaux d'instrumentation d'une digue existante le long de la Loire. Les électrodes sont installées en tranchée (à gauche) et localisées par GPS. A droite, le système d'acquisition. D'après Palma-Lopes, 2010.*

## **10. CAS DES DIGUES MARITIMES**

La technique peut tout à fait s'appliquer dans un contexte côtier. La mesure de résistivité est influencée par la présence d'eau mais également par sa salinité, l'interprétation doit donc en tenir compte si la mesure se fait en période de charge de la digue. En période de charge, le milieu très conducteur imposera également de forts courants d'injection (de l'ordre de l'Ampère). Le retour d'expérience d'une instrumentation à long terme a montré que les électrodes enfouies résistent bien à l'agressivité du milieu marin.

## **11. RÉFÉRENCES**

- Blais J.-P. (2010), *Méthodologie opérationnelle pour le diagnostic d'érosion interne et de fuites dans les digues en terre, par reconnaissances non destructives - expérience d'EDF* - Journées scientifiques de géophysique appliquée, congrès AGAP 2010, St Brieuc.
- Choppin L., Palma-Lopes S. (2003), *Mesure continue de la topographie littorale par imagerie de résistivité électrique*, 4<sup>ème</sup> colloque Geofcan, Paris.
- Fauchard C. & Mériaux P. (2004), *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues*, Éditions Quæ.
- Loke M. (1996), *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method*, Geophysical Prospecting, Vol. 44, p.131-152.
- Marescot L. (2006), *Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol*, Bulletin de la Société vaudoise de Sciences naturelles, 90.1, p. 23-40.
- 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 AGAP 2010, St Brieuc.
- Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012) – *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.

**Annexe G**  
Fiche détaillée LiDAR



## Technique de mesure : LiDAR aéroporté très haute résolution

Technique de mesure	Caractéristique mesurée	Mécanismes de défaillance
Système de balayage laser haute fréquence embarqué sur aéronef volant à basse altitude.	Distances entre l'aéronef et la surface puis, après traitement, coordonnées X, Y, Z d'une grande densité de points au sol (50 à 200 points / m <sup>2</sup> )	Tous mécanismes (recherche d'indices directs ou indirects de mécanisme de dégradation ou de rupture)

### 1. PRINCIPE

#### 1.1 GÉNÉRALITÉS

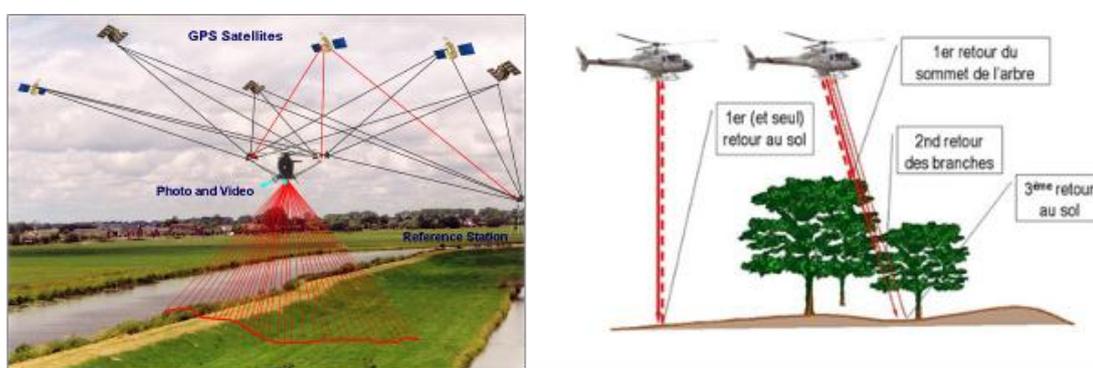
Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un outil de levé topographique. Cette technique de télédétection « active » émet un signal laser à partir d'un émetteur/récepteur monté sur une plate-forme aéroportée (avion ou hélicoptère) ou terrestre. Une partie de la lumière est diffusée ou absorbée par le milieu visé, l'autre est rétrodiffusée en direction de la source du rayonnement (cf. fig. 1b). Dans ce dernier cas, la distance est mesurée entre la source laser (aéronef ou site terrestre) et le premier point rencontré par ce même laser (végétation, bâti ou surface terrestre). La technique permet, donc, d'obtenir la topographie de la zone survolée, ainsi que la forme de tous les objets, mobiles ou non, présents sur les ouvrages (avant filtrage).

Cette technique de télédétection par balayage laser permet ainsi d'acquérir des données topographiques sous la forme de nuages de points 3D géo-référencés. Elle est utilisée de façon courante pour étudier la topographie du lit majeur des fleuves et rivières [Comes Pereira & Wicherson, 1999]. Le système est alors transporté par avion et vise le sol. Des bandes de terrain de plusieurs centaines de mètres de largeur sont scannées en un seul passage et les précisions obtenues en X, Y, Z sont décimétriques à pluri-décimétriques, avec une densité de l'ordre de 1 à 5 points / m<sup>2</sup>. Ce qui est suffisant pour construire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) exploitable, par exemple, dans des modèles hydrauliques de propagation des crues ou des inondations.

Pour l'application à l'étude topographique des digues de protection contre les inondations et compte tenu de la relative faible hauteur de ces ouvrages, une précision plus grande est recherchée : centimétrique à pluri-centimétrique, avec une densité au sol (avant interception par des éléments hors sol, tels que la végétation) de plusieurs dizaines de points par m<sup>2</sup>. Par conséquent, on déploie des systèmes héliportés haute résolution, évoluant à basse altitude (100 à 300 m).

## 1.2 SYSTÈMES LIDAR À TRÈS HAUTE RÉOLUTION POUR LES DIGUES

Parmi les cabinets de topographie qui, de plus en plus nombreux, proposent des services d'acquisition LiDAR aéroportés, Fugro-Geoid a développé un système laser altimétrique hélicoptère à très haute résolution qui intègre un dispositif d'imagerie aérienne haute définition : FLI-MAP (Fast Laser Imaging and Mapping Airborne Platform). Dans sa version la plus récente (FLI-MAP 400, 2010), la plateforme de mesures embarquée dans l'hélicoptère est équipée d'un distance-mètre laser haute fréquence (250 kHz), à trois plans de balayage (avant 7°, vertical pour 50% des points, arrière 7°) dans le sens du vol et développant un angle de scan de 60° dans le sens perpendiculaire à la direction du vol (cf. fig. 1.a), d'un système de positionnement GPS temps réel, d'une unité de mesures des paramètres de vol et d'une caméra « linescan » permettant la coloration RVB des points lasers en temps réel. Les trois plans de balayage de l'émetteur-récepteur laser, obtenus grâce à un système de miroir oscillant à trois positions, permettent de limiter les effets d'ombre (cf. fig. 1 b.).



**Figure 1** : Principe de fonctionnement du système LiDAR hélicoptère FLI-MAP (sources FUGRO-GEOID) : 1 a. (à gauche) : Positionnement GPS temps réel et angle de scan transversal. 1 b. (à droite) : Illustration de deux des trois plans de balayage dans le sens du vol.

De plus, le système comprend deux types de dispositifs d'acquisition d'images haute définition : deux caméras vidéo couleurs numériques, une verticale et une frontale, et trois chambres de prise de vues numériques (cf. fig. 2), deux verticales (26 Mpixels) et une frontale (16 Mpixels).



**Figure 2** : Prises de vue oblique et verticale haute définition d'un ensemble de bâtiments partiellement encasté dans le talus côté val d'une levée (source : projet FloodProBE, site pilote du Val d'Orléans).

Un tel système évoluant à 150 m d'altitude par rapport au sol permet d'obtenir, sur une largeur utile de corridor garantie d'au minimum 105 m et avec un rendement de 80 à 100 km/jour :

- une densité supérieure à 80 points/m<sup>2</sup> ;
- une précision absolue en X, Y de 5 cm et de 3 cm en Z en conditions favorables (herbe rase) ;
- une résolution d'imagerie de 25 mm au sol sur un corridor de 120 m.

A ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas de système intégré LiDAR équivalent à FLI-MAP sur le marché de l'ingénierie topographique. Néanmoins, il est possible, à l'appui d'un cahier des charges suffisamment générique, d'obtenir des prestations quasi-équivalentes auprès d'un panel de cabinets spécialisés du domaine.

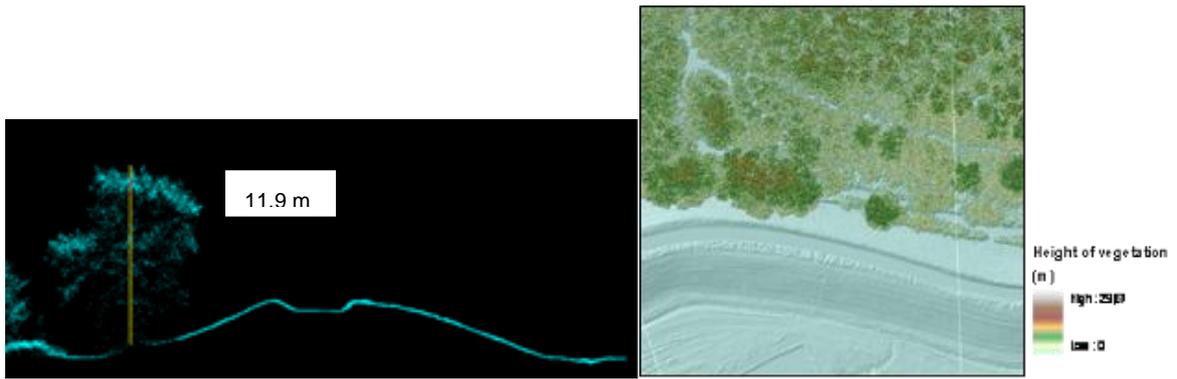
## **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

Le LiDAR aéroporté très haute résolution couplé à son imagerie aérienne haute définition 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 :

- les mécanismes résultant d'une topographie défavorable de l'ouvrage (ex : pente raide des parements), de son environnement (ex : érosion de berge proche du pied de digue), ou de l'absence d'un ouvrage de protection (ex : pas de revêtement maçonné) ;
- les mécanismes ayant un impact sur la topographie de l'ouvrage ou de son environnement (ex : fontis, érosions externes, ...)
- ceux susceptibles d'être favorisés par des singularités partiellement visibles en surface (ex : gros terrier, regard de conduite, végétation arborée, ...).

Le tableau 1, page suivante, extrait de [Auriau, Mériaux & al., 2012], développe l'analyse qui précède, mécanisme par mécanisme, pour les digues fluviales.

Le système LiDAR haute résolution se révèle aussi particulièrement intéressant pour le levé des digues de protection envahies par la végétation arbustive ou arborée, gênant - et donc rendant coûteuse - la progression des équipes de topographes terrestres en levé traditionnel. A condition de faire appel à une technique à très haute densité (> 50 points par m<sup>2</sup>) et d'intervenir de préférence en automne ou en hiver (feuilles tombées), le LiDAR permet non seulement de s'affranchir - au moins partiellement - de la "perte" de points résultant de l'inévitable interception par le couvert végétal (i.e. un nombre suffisant de points "arrivent" au sol pour s'assurer de la qualité du futur MNT), mais aussi de caractériser (identification, cartographie, hauteurs, ...) la végétation arborée grâce à un traitement adéquat des points que le couvert intercepte (cf. figures 1 b. et 3). La végétation ligneuse, notamment par l'effet du développement racinaire, étant un facteur de risque important vis-à-vis de l'érosion interne des remblais ou de l'intégrité des structures en maçonnerie ou des drains, sa caractérisation fine fait partie des tâches incontournables de tout diagnostic de digue mal entretenue.



**Figure 3** : Caractérisation LiDAR en coupe et en plan de la végétation de bord de digue : coupe laser à gauche, MNT avec végétation à droite (source : projet FloodProBE, site pilote du Val d'Orléans).

MECANISMES DE DEGRADATION	ELEMENTS TOPOGRAPHIQUES	
	Singularités topographiques aggravantes	Effets sur la topographie
<b>Erosion interne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- étroitesse du profil en travers de la digue (rapport hauteur / largeur d'emprise à la base trop fort) ;</li> <li>- ouvrages traversants en service ou abandonnés dans le corps de digue ou sa fondation : se repérant par leurs entonnements, leurs vannes, leurs regards de visite ou les stations de pompage attenantes ;</li> <li>- structures encastrées ;</li> <li>- zones d'interface ou de transition entre deux types de digue de constitution différente ;</li> <li>- présence d'arbres [Clément &amp; Mériaux, 2007] [Vennetier, Mériaux &amp; al., 2010].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fontis ;</li> <li>- affaissement en crête ou sur le talus ;</li> <li>- présence éventuelle d'ouvrages provisoires de calfeutrage de fuites (ex : monticules de sacs de sable) ;</li> <li>- sand-boils (ou « volcans de sable ») en pied de talus côté terre, après une crue.</li> </ul>
<b>Surverse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- points ou zones basses sur le profil en long de la crête de digue ;</li> <li>- singularités sur la crête de digue ;</li> <li>- resserrement du lit majeur endigué (rehaussant la ligne d'eau en crue).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- érosion de la crête, du talus ou du pied de digue côté val (si surverse avérée) ;</li> <li>- présence d'ouvrages provisoires de rehausse ou de bouchure en crête.</li> </ul>
<b>Glissement de talus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- raideur du talus ;</li> <li>- étroitesse du profil en travers de la digue.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- irrégularités du talus, ventre ou loupe de glissement ;</li> <li>- basculement de mur, fissure et/ou affaissement en bordure de crête.</li> </ul>
<b>Tassement de la fondation ou du remblai</b>	/	<ul style="list-style-type: none"> <li>- affaissement généralisé en crête.</li> </ul>
<b>Erosion externe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- raideur du talus côté rivière ;</li> <li>- absence d'un ouvrage de protection côté rivière ;</li> <li>- irrégularités, présence de structures saillantes sur le parement côté cours d'eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- anses d'érosion ;</li> <li>- glissement du talus (se reporter ci-dessus) ;</li> <li>- sous-cavages (visibles uniquement en topographie subaquatique ou par l'intermédiaire d'une acquisition LiDAR en basses eaux).</li> </ul>
<b>Brèche avérée (historique)</b>	/	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dépression ou mare au pied côté val de la digue (ancienne fosse d'érosion de la brèche)</li> </ul>

**Tableau 1:** Liens entre topographie et mécanismes de dégradation ou rupture des digues.

### **3. RAYON D'ACTION**

Le rayon d'action dépend de la hauteur de vol de l'aéronef. Par comparaison, l'hélicoptère présente les avantages de pouvoir voler dans des zones de survol difficile (ex : vallées étroites de montagne), à plus basse altitude et plus lentement que l'avion. Ce qui permet d'obtenir des densités élevées de points au sol ( $> 50$  points/m<sup>2</sup>). A contrario, la fauchée (i.e. largeur de la bande ou du corridor mesurée au sol) est plus étroite et, si nécessaire, il faut prévoir plusieurs allers et retours contigus pour couvrir une surface donnée selon la hauteur de vol. La technique LiDAR héliportée est donc particulièrement bien adaptée au levé ou au suivi d'infrastructures linéaires et étroites tels que les digues ou les berges de rivière, ou de la végétation arborée présente sur celles-ci, pour lesquelles l'acquisition aéroportée haute résolution ne requiert qu'un seul passage. Pour donner un ordre d'idée, en 2010, la technologie permet une fauchée de 105 m, pour une hauteur de vol de l'hélicoptère de 150 m.

Par contre, il est à noter que le rayon laser ne pénètre pas dans le sol, ni dans l'eau. Si on souhaite caractériser la plus grande surface possible de digue et de son environnement (berge, estran), il est préférable de programmer le vol d'acquisition LiDAR hors période de crue, idéalement à l'étiage, ou au moment de la basse mer pour les digues maritimes.

### **4. PERSPECTIVES D'APPLICATION EN TÉLÉ-AUSCULTATION**

Comme le rendement d'acquisition in situ est très rapide (60 à 80 km de longueur de corridor par jour), on peut envisager la répétition de vols LiDAR à intervalles réguliers sur des grands linéaires [Mériaux, Monier & al., 2012], voire des vols en post-crue.

#### **4.1 AUSCULTATION DE LA DIGUE STRICTO SENSU**

Pour faire de cette technique un dispositif d'auscultation topométrique, il suffit de répéter les survols laser à intervalles réguliers au dessus de la zone à surveiller : par exemple, une crête de digue. Non encore déployé en France à notre connaissance pour un tel usage, le LiDAR héliporté semble régulièrement utilisé par les gestionnaires de digues néerlandais pour surveiller les tassements plus ou moins localisés affectant les ouvrages ou leur fondation et les réductions de revanche qui en résultent. En France, des besoins de ce type existent pour les digues à fondation karstique (ex : levées du Val de Loire) où des affaissements en surface peuvent être révélateurs d'effondrements plus en profondeur et précèdent des désordres graves. En outre, il existe probablement sur notre territoire un nombre significatif de digues construites sur des fondations compressibles, en particulier sur les façades maritimes ou les zones de delta. Pour obtenir la précision centimétrique requise pour des mouvements de faible ampleur, il est toutefois nécessaire que la surface visée soit dénudée de toute végétation, plane et régulière : typiquement une chaussée de route ou de chemin, bétonnée, goudronnée ou en matériau granulaire.

## **4.2 SUIVI GÉOMORPHOLOGIQUE DU LIT**

En complément du suivi topographique de la digue elle-même, on peut s'intéresser à l'évolution du lit du cours d'eau dont elle protège des crues ou des plages ou estrans situés devant les digues à la mer. Ceci est particulièrement important pour les digues fluviales s'approchant des lits mineurs, notamment en montagne où les cours d'eau possèdent un régime torrentiel marqué du fait des pentes élevées et sollicitent fortement les pieds ou talus de digue par incision ou divagation. Ces mécanismes géomorphologiques font évoluer la géométrie du lit en quelques années au gré des crues successives.

A ce titre, répéter à quelques années d'intervalle un levé topographique laser sur un tel cours d'eau va permettre de suivre qualitativement et quantitativement l'évolution :

- du tracé en plan du lit principal (reptation des méandres) et d'éventuels chenaux secondaires (lit à tresses) ;
- du profil en long du lit mineur, à condition toutefois que le lit mouillé soit peu profond au moment du vol (en effet, les rayons laser des LiDAR topographiques classiques ne pénètrent pas dans l'eau et, dans un cours d'eau profond, le profil en long du fond du lit ne peut pas être assimilé à celui de la ligne d'eau) ;
- de dépôts torrentiels hors d'eau (évaluation de la recharge ou du déficit sédimentaire d'une campagne à l'autre) [Notebaert, et al., 2008] [Génin, 2009] ;
- des principales érosions de berge.

Une telle approche peut être étendue au suivi des estrans devant les digues maritimes.

Dans ces applications à objectif morphologique pour le lit majeur, il faut trouver un compromis entre la précision souhaitée (le décimètre suffit en général) et la largeur du corridor à survoler, étant en principe supérieure à celle de la seule emprise de la digue. Si un suivi topométrique de la digue est également souhaité, on peut alors fort bien programmer un vol LiDAR en deux phases : survol à basse altitude de la digue sensu stricto (très haute précision, corridor étroit) et à plus haute altitude du lit endigué (précision moindre, corridor plus large).

## **4.3 SUIVI DE LA VÉGÉTATION LIGNEUSE SUR, OU À PROXIMITÉ DE, LA DIGUE**

Le LiDAR aéroporté haute résolution, couplé à l'acquisition de photographies aériennes géoréférencées, permet, comme vu précédemment, de caractériser et de cartographier la végétation ligneuse présente sur la digue ou à ses abords (cf. fig. 3). Un tel apport est crucial dans un processus de diagnostic à un instant donné, tout au moins pour les digues françaises qui, de nos jours, sont souvent boisées.

Mais, ici encore, en répétant l'acquisition laser et d'images aériennes à intervalles réguliers (tous les dix ans par exemple) et en renouvelant la caractérisation et la cartographie des espaces végétalisés, on pourrait suivre quantitativement l'évolution des peuplements ligneux sur ou dans l'environnement immédiat de la digue (ex : croissance en hauteur) et anticiper les opérations de gestion. Les digues de l'Isère, gérées par l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche et dotées d'un plan de gestion des végétaux ligneux, constituent un terrain d'application tout-à-fait favorable à ce titre.

## 5. TRAITEMENT DES DONNÉES ET LIVRABLES

Les livrables d'une mission LiDAR aéroportée très haute résolution, telle que celle effectuée avec un système de type FliMap, comprennent :

- les nuages de points lasers bruts ;
- les modèles numériques de surface (MNS)<sup>2</sup> et de terrain (MNT) construits à partir du nuage de points laser avec un maillage fin (10 ou 20 cm) ;
- les images géoréférencées et orthorectifiées haute définition et des vidéos, concernant les levées et ouvrages associés présents dans les corridors survolés ;
- à la demande, des plans topographiques à l'échelle 1/500° et des profils en long ou en travers.

Les photos aériennes sont prises avec un taux de recouvrement de 50 %. La taille des pixels est de 25 mm au sol (cf. fig. 2). A partir des photos aériennes verticales brutes et de la position connue de l'hélicoptère, une mosaïque de photos géoréférencées et orthorectifiées des digues est établie.

Le modèle numérique de surface (MNS) contient les informations du premier écho du radar, c'est-à-dire l'enveloppe « végétation et bâti » (cf. fig. 4). Les éléments tels que les voitures, les personnes, les lignes électriques, etc. sont filtrés par le prestataire topographique (grâce à un processus partiellement automatisé). La topographie subaquatique n'apparaît pas non plus sur le MNS car ce type de laser ne traverse pas l'eau.



**Figure 4** : Modèle Numérique de Surface (MNS) d'une digue et de ses abords, à la grille de 10 cm, comprenant la topographie, la végétation et le bâti (source : projet FloodProBE, site pilote du Val d'Orléans).

---

<sup>2</sup> Appelé aussi Modèle Numérique d'Élévation (MNE).

D'autres produits MNS peuvent être créés : un MNS sans végétation, pour ne faire apparaître que le bâti ; et à l'inverse un MNS sans bâti pour ne laisser que la végétation (cf. fig. 3). Ceci permet de mieux analyser tour à tour le bâti et la végétation sous SIG.

Le modèle numérique de terrain (MNT) contient des données laser filtrées, laissant apparaître la topographie uniquement. Il comprend les digues et tous les éléments constitutifs ou ouvrages hydrauliques associés (parapets, banquettes, vannages, ...). Les données enregistrées par laser sont filtrées, tout d'abord par un traitement automatique, puis manuel, afin d'enlever les éléments n'appartenant pas à la topographie du sol ou aux ouvrages hydrauliques, tels que la végétation et les bâtiments hors digue, etc.

Ces données sont livrées par le prestataire topographique au format électronique SIG ou DAO dans un délai de plusieurs semaines après le vol. Toutefois, leur exploitation à des fins de contribution au diagnostic ou au suivi des digues exige de la part du gestionnaire d'ouvrage des compétences en traitements SIG. Les travaux de recherche d'Irstea ont abouti à des notes de recommandations proposant une méthodologie efficace d'exploitation sous SIG des données LiDAR et d'imagerie aérienne à de telles fins [Royet & al., 2012].

Bilan technicité requise

	Opérateur		Technicien supérieur		Ingénieur			Expert		
Collecte des données										
Traitement										
Interprétation										

## 6. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE

En France et à notre connaissance, depuis 2006, la technologie LiDAR très haute résolution n'a été appliquée qu'à quatre reprises sur un long linéaire de digues (2006, 2007, 2010 et 2012). Grâce à plusieurs programmes de recherche ou de subventions, dont le projet européen FloodProBE, des méthodologies efficaces d'expertise ou d'exploitation des données sont proposées [Auriau, Mériaux & al., 2012] [Royet & al., 2012] [Ripert, Liébault, 2012] [Boutry et Mériaux, 2013]. Toutefois, dans le domaine de la gestion des lignes électriques et des voies ferrées, elle est reconnue depuis un certain temps.

A contrario, elle est très développée aux USA (diagnostics post-Katrina, à la Nouvelle-Orléans) et aux Pays-Bas (problèmes d'affaissement et de tassement dus à la compressibilité des sols de fondation) pour l'auscultation des digues.

## 7. FIABILITÉ DE LA TECHNOLOGIE ET LIMITES

La précision en X, Y, Z de la technologie LiDAR hélicoptérée est pluri-centimétrique : ce qui est amplement suffisant pour les applications topographiques classiques, y compris en présence de végétation.

En revanche, vis-à-vis de l'auscultation des digues, la technologie présente les principales limites suivantes :

- son coût au km n'est réellement compétitif que si la campagne de levé porte sur un linéaire d'ouvrages d'au minimum 60 km, permettant d'optimiser la mobilisation d'une journée pleine d'hélicoptère. Lever cette limite nécessite que les responsables de courtes digues s'entendent localement pour regrouper les linéaires à survoler par campagne ;
- à moins de déployer en complément un LiDAR de type bathymétrique (coûteux et bien moins précis), elle ne permet pas d'acquérir – et donc de suivre – la topographie subaquatique. Ce qui fait qu'elle ne peut être utilisée seule pour ausculter des instabilités de talus de digue dont la partie basse du cercle de glissement concernerait la partie de berge immergée ;
- elle reste sensible à un développement excessif de la végétation arborée, arbustive ou herbacée qui inévitablement affecte la densité de points arrivant au sol et donc la précision finale. En vue de détecter des tassements centimétriques, un suivi altimétrique n'est ainsi envisageable que si les surfaces visées sont dénudées et régulières. Enfin, il est préférable de programmer les vols en hiver, hors période de végétation.
- pour une mise en œuvre urgente en crue ou post-crue, la limite est, bien sûr, une nécessaire anticipation de l'organisation de la mission aéroportée et de son financement. Une utilisation des données LiDAR pour une gestion temps réel de la crue est peu réaliste compte tenu des délais de mise à disposition des informations. Elle est, cependant, envisageable dans un processus de diagnostic post-crue visant à repérer et quantifier les éventuels mouvements topographiques dus à la crue ou à la décrue (tassements, glissements, ...), à inventorier les désordres de surface et à définir les réparations urgentes.

## **8. INVESTISSEMENT**

Les rendements in situ des acquisitions LiDAR héliportées sont élevés : jusqu'à 80 km par jour. Ce qui permet d'envisager leur déploiement sur de grands linéaires dans des situations de relative urgence (après une crue majeure, par exemple). A condition de dépasser une longueur de levé de 60 à 80 km (correspondant à une journée d'hélicoptère), les coûts obtenus au final sont tout-à-fait compétitifs par rapport à une topographie classique par voie terrestre : soit de l'ordre de 2 000 à 2 500 euros / km, avec fourniture de profils en long et plans topographiques et de l'ensemble des produits d'imagerie aérienne que l'on n'obtient évidemment pas avec une topographie uniquement terrestre.

## **9. RÉFÉRENCES**

Comes Pereira L.M & Wicherson R.J. (1999). *Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones*. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 105-114.

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.

Clément A., Mériaux P. (2007) - *Apports de la télédétection LiDAR hélicoptérée pour la reconnaissance des digues françaises : premiers résultats*. Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection, n° 186, p. 87-91

Vennetier M., Mériaux P., Busset, F., Félix, H., Lacombe, S. (2010) - *Apport de la télédétection LiDAR aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues*. Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection n°191, pp. 36-40.

Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012) – *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.

Notebaert, et al. (2008) - *Calcul des volumes d'érosion/de dépôts sédimentaires en géomorphologie fluviale grâce à deux levés Lidar successifs*.

Génin, J.-R. (2009) – *Application de la télédétection pour la caractérisation des changements géomorphologiques d'une rivière en tresses*. Mémoire de Master en Sciences de l'Environnement Terrestre, sous la direction de Dufour S. (CEREGE) et Liébault F. (Irstea).

Royet P., Palma Lopes S., Fauchard C., Mériaux P., Auriou L. (2012) – *Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing*. FloodProBE EU Project Report – Task 3.2.

Mériaux P. (2012) - *LiDAR data and very high resolution aerial image acquisition: Technical Specifications (TS) Template*. FloodProBE EU Project Deliverables. Task 3.2.2.

Ripert E., Liébault F. (2012) - *Rapport d'expertise des données LiDAR aéroportées du Guil et de ses affluents*. Rapport pour le compte du Parc Naturel Régional du Queyras.

Boutry M., Mériaux P. (2013) - *Éléments méthodologiques d'exploitation de données LiDAR haute résolution, pour contribuer au diagnostic des digues torrentielles : cas d'application sur quatre tronçons du Guil et affluents*. Rapport pour le compte du Parc Naturel Régional du Queyras.



## **Annexe H**

Fiche détaillée Polarisation spontanée



## Technique de mesure : Polarisation spontanée

Technique de mesure	Caractéristique mesurée	Mécanismes de défaillance
Polarisation spontanée	Potentiel électrique/ Electrofiltration	Fuite

### **1. PRINCIPE**

Lorsqu'un liquide, ici l'eau, traverse un milieu poreux, il se développe à l'amont et à l'aval du milieu des potentiels électriques dits d'électrofiltration. Ces potentiels  $\Delta P$ , qui sont de l'ordre de quelques mV à quelques centaines de mV lorsque les circulations sont importantes, dépendent de différents facteurs, dont le gradient hydraulique  $\Delta p$ , la conductivité  $\sigma$ , la constante diélectrique  $\epsilon$ , la viscosité  $\eta$  du liquide et enfin du potentiel  $\zeta$  (zeta) qui caractérise le milieu poreux. Le potentiel d'électrofiltration s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta V = \frac{\epsilon \zeta}{\sigma \eta} \Delta P$$

La méthode PS consiste à mesurer entre deux électrodes fixées dans le sol ou disposées dans l'eau 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.

### **2. MÉCANISMES DE RUPTURE SURVEILLÉS**

La mesure de l'électrofiltration donne le moyen de surveiller les circulations d'eau au sein des digues en terre ou autre granulat. Lorsque ces circulations sont anormalement importantes relatives à la perméabilité moyenne de la digue, on parle alors de fuite. Ces fuites sont à l'origine de l'érosion des digues qui peuvent conduire, dans les cas extrêmes, à leur rupture. Détecter les fuites permet donc de les traiter et ainsi prévenir les risques de rupture de digue.

### **3. RAYON D'ACTION**

Les phénomènes d'électrofiltration dépendent essentiellement de la nature de la fuite (taille, débit, tortuosité...) mais également de la nature de la digue et des fluides (permittivité, résistivité...). Le rayon d'action de la méthode dépend alors de ces paramètres. Il faut que le dispositif de mesure de la polarisation spontanée couvre au moins la zone de fuite et une autre zone imperméable servant de référence. Plus la fuite est importante, plus elle peut être détectée profondément dans la digue. Cependant, l'anomalie en surface est plus grande et nécessite donc un dispositif plus étendu. Lorsque le contraste avec l'encaissant est suffisant, un linéaire ou un maillage d'électrodes espacées de quelques mètres de distance peut couvrir et détecter des fuites de petite taille (décimétrique, métrique...).

### **4. COLLECTE DES DONNÉES / APPLICABILITÉ À LA TÉLÉSURVEILLANCE**

Les données recueillies prennent un volume relativement faible même avec un dispositif composé de nombreuses électrodes. Ce qui permet d'installer une surveillance légère avec un flux de données réduit. Cette méthode de surveillance peut être considérée comme légère.

### **5. TRAITEMENT DES DONNÉES**

Le traitement des données peut être séparé en deux niveaux distincts : l'un simple avec un traitement du signal classique et une cartographie sur la base de la répartition des électrodes sur la digue. Les anomalies de polarisation spontanée sur la carte indiquent la localisation des zones d'électrofiltration pouvant être interprétées sans autre traitement comme des fuites (Figure 1).

L'autre traitement consiste en une inversion des données sur la base des équations simulant le phénomène. Divers logiciels ont été développés (Ishido T. et Pritchett J. W., 1999 ; Bolève et al, 2008). Ils permettent de remonter aux caractéristiques de la source. Ces traitements sont délicats de part les nombreuses équivalences de résistivité que l'on peut trouver dans le sol.

Bilan technicité requise

	Opérateur	Technicien supérieur	Ingénieur	Expert
Collecte des données				
Traitement				
Interprétation				

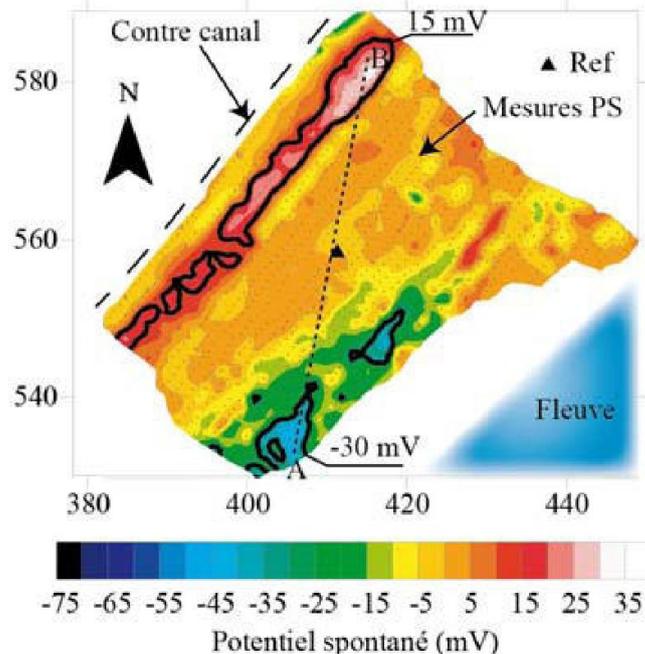


Figure 1 : Carte de polarisation spontanée sur une digue montrant une forte anomalie dipolaire indiquant un écoulement préférentiel (Bolève et al, 2008)

## 6. MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE

Cette méthode a largement fait ses preuves lorsqu'il s'agit de discriminer les zones d'écoulement préférentiel dans les digues et sur des linéaires relativement importants. Elle est très bien adaptée à la problématique des fuites d'eau ou de saumure à travers les digues. Il reste cependant un champ d'investigation scientifique assez large ; notamment dans l'inversion des données de polarisation spontanée et la compréhension des phénomènes à la source.

L'exploitation de la technique dans une démarche de surveillance d'une portion de digue n'est pas aujourd'hui validée et des difficultés sont d'ores et déjà identifiées :

- dérive à long terme de la mesure du fait du caractère non-polarisable des électrodes utilisées : si le phénomène à caractériser est très faible il risque d'être masqué par cette dérive ;
- la dessiccation du terrain ou au contraire une augmentation de la teneur en eau suite à un épisode de forte pluviométrie perturbent la mesure ;
- la technique cherchant à identifier et caractériser une circulation d'eau au sein de la digue, elle ne sera réellement pertinente qu'en période de sollicitation, lorsque la digue est en charge.

Malgré les capacités de la technique à réaliser le diagnostic d'une digue à un instant donné, une configuration permanente semble peu exploitable à des fins de surveillance.

Le projet ERINOH, mené notamment par EDF, a inclus, entre autres, la pose d'un réseau de mesure des écoulements par polarisation spontanée, malheureusement les résultats de cette expérimentation ne sont pas connus à ce jour.

## **7. FIABILITÉ DE LA MESURE**

La mesure du potentiel d'électrofiltration est en elle-même simple. Cependant, la difficulté majeure de ce type de mesure réside dans l'existence dans le sol de potentiels électriques perturbateurs importants d'origine naturelle ou anthropique :

- potentiel de polarisation des électrodes ;
- potentiel tellurique lié au géomagnétisme (orage magnétique, courant ionosphérique, etc.) ;
- potentiel tellurique lié à l'activité humaine (usine, site industriel, ligne électrique, réseau, etc.) ;
- potentiel d'électrofiltration lié à la pluie ;
- potentiel biologique lié à l'activité des plantes et arbres ;
- potentiel électrique lié aux écarts de température, de ph de l'eau, de la pression atmosphérique...

Ces potentiels « parasites », pouvant représenter des variations de plusieurs centaines de % par rapport au potentiel d'électrofiltration lié aux fuites recherchées, rendent les mesures erratiques et difficiles. Aussi, le dispositif et la méthodologie de mesure doivent être conçus de façon à remédier ou tout au moins à pallier ces perturbations. Il est essentiel d'opérer un calibrage pour chaque nouveau site expérimental. Entre autres, il y a deux précautions principales à prendre lors d'une surveillance opérationnelle :

- la mesure de dérive sur une paire d'électrodes de référence ;
- l'écart de mesure entre deux électrodes placées au même endroit.

La première mesure met en évidence les variations de polarisation spontanées extérieures au système et la seconde mesure donne la fidélité de la mesure indépendamment de l'électrode utilisée.

## **8. MISE EN ŒUVRE**

Le dispositif de mesure de la polarisation spontanée est assez simple à la fois en termes d'équipement et de mise en place. Il est constitué d'électrodes, d'un résistivimètre et d'un multiplexeur pour optimiser le temps de prise de mesure. Le dispositif peut être identique pour les autres méthodes électriques (panneau, sondage...). Cependant, il est essentiel d'utiliser des électrodes non-polarisables.

Généralement, l'une des électrodes est de référence rejetée « à l'infini », c'est-à-dire assez loin, dans une zone non perturbée par les circulations. La distance de l'électrode de référence est dépendante de la taille du dispositif.

Pour une surveillance opérationnelle des digues, il est préférable d'installer le dispositif de polarisation spontanée pour couvrir chacune des étapes de chargement de la digue. L'interprétation des anomalies de polarisation spontanée sera d'autant plus pertinente pour décrire les fuites et éventuellement en quantifier le débit.

## **9. INVESTISSEMENT**

Le prix du dispositif de polarisation spontanée est équivalent à celui du dispositif du panneau électrique. Ce prix dépend du nombre d'électrodes et peut être estimé à 50k€ hors pose pour 100 électrodes.

## **10. CAS DES DIGUES MARITIMES**

Au-delà des difficultés déjà évoquées dans le cas d'une exploitation de la technique dans une configuration permanente, la salinité de l'eau en contexte maritime peut apporter une difficulté supplémentaire : dans le cas de digue à noyau d'argile le contraste avec l'eau salée, bon conducteur, sera d'autant plus faible. L'exploitation d'un dispositif de surveillance permanent est donc au moins aussi délicate en contexte maritime que fluvial, si ce n'est davantage.

## **11. RÉFÉRENCES**

Bolève A. (2009), *localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*, Thèse à l'Université de Savoie - Faculté des sciences : Terre, Univers, Environnement de Grenoble.

Ishido T. (1999), *Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow*, Journal of Geophysical Research, 104(B7), p. 15,247-215,259.