

L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer

Monitoring of flood protection dikes : a concept still to be imagined

Patrice Mériaux

Irstea - Groupe de Recherche "Ouvrages hydrauliques"
CS 40061, 13182 Aix-en Provence Cedex 5
patrice.meriaux@irstea.fr

Thierry Monier

SOGREAH Groupe ARTELIA Eau et Environnement
6, rue de Lorraine, 38130 Echirolles
thierry.monier@arteliagroup.com

Rémy Tourment

Irstea - Groupe de Recherche "Ouvrages hydrauliques"
CS 40061, 13182 Aix-en Provence Cedex 5
remy.tourment@irstea.fr

Thibaut Mallet

SYMADREM – Direction technique
448, avenue Abbé Pierre, Route des Saintes Maries de la mer, 13200 ARLES
thibaut.mallet@symadrem.fr

Sérgio Palma Lopes

LUNAM, IFSTTAR - Groupe Auscultation et Imagerie,
Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais Cedex
sergio.lopes@ifsttar.fr

Jean Maurin

DREAL Centre - Service Loire et Bassin Loire-Bretagne
5 avenue Buffon, BP 6407, 45064 ORLEANS Cedex 2
jean.maurin@developpement-durable.gouv.fr

Michel Pinhas

Association Départementale Isère-Drac-Romanche, Direction
2 chemin des Marronniers, 38100 Grenoble
pinhas.adisere@wanadoo.fr

MOTS CLÉS

Levees safety, surveillance, monitoring

RÉSUMÉ

Le décret du 11/12/2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques n'impose pas de dispositif d'auscultation pour les digues de protection contre les inondations. En effet, le long linéaire de ces ouvrages, en terre et anciens dans leur grande majorité, et le fait qu'ils ne subissent que des sollicitations hydrauliques temporaires, rendent difficiles ou non pertinentes les mesures périodiques d'auscultation - notamment hydrauliques (jaugeage des débits de drainage) – tout au moins selon les modalités avec lesquelles elles sont pratiquées par exemple pour les barrages en remblai. Néanmoins, quelques dispositifs d'auscultation sont déployés par les gestionnaires de certaines digues, d'autres ont été ou sont testés. L'objectif est essentiellement de compléter les appréciations visuelles, issues des tournées de surveillance périodiques, par des mesures quantitatives permettant de mieux appréhender le comportement d'un tronçon d'ouvrage pour en prévenir les risques de défaillance. Dans ce contexte, la présente communication pose les premiers jalons à l'intégration de l'auscultation dans un dispositif de surveillance de digues de protection contre les inondations. Trois axes y sont successivement développés : (i) spécificités de ces digues vis-à-vis de l'auscultation, (ii) état des lieux des pratiques d'auscultation déjà en place, basé sur une enquête auprès de quelques gestionnaires représentatifs et (iii) passage en revue des dispositifs d'auscultation disponibles dans le domaine des barrages et canaux et transposables aux digues fluviales pour la surveillance courante ou des systèmes d'alerte. La pertinence et les limites de chaque dispositif sont discutées. Des pistes de réflexion en vue de développer ou d'adapter ces méthodes d'auscultation sont esquissées. Une grille d'analyse récapitulative est proposée en conclusion.

ABSTRACT

The recent French regulations (2007) related to dam and dike safety don't prescribe any monitoring device for flood protection dikes. Because of the long linear dimension of these structures - generally ancient embankments - and because they endure only temporary hydraulic head, it is difficult - or even not pertinent - to collect periodic monitoring measurements - especially drainage discharge measurements, at least the way it is usually done on earth dams, for example. Nevertheless, some monitoring methods are used - or have been tested - by several dike operators. The main objective is to complete regular visual observations with quantitative measurements, which allow to estimate the behaviour of a part of the structure and to anticipate failure hazards. In this context, the present paper shows the way monitoring measurements could be integrated into the surveillance organisation of flood protection dikes. Three axis are successively detailed: (i) specific requirements of these dikes in relation to monitoring, (ii) inventory of practical methods that have been used, thanks to a survey conducted on representative dike operators, and (iii) examination of monitoring devices used for dams and canal dikes, which could be transposed to fluvial dikes for usual surveillance or alert system. Pertinence and limits of each method are analysed. Thought tracks to improve or adapt these monitoring methods are approached. And at last, an analysis table to sum up is set up.

1. INTRODUCTION

Comme pour les autres types d'ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, digues à charge permanente), la sécurité des digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines dépend de leur bon état, et de leur bonne gestion, celle-ci comprenant une évaluation permanente de leur niveau effectif de sûreté. Cette tâche d'évaluation (ou de diagnostic) est effectuée à différents niveaux de précision, entre autres par l'intermédiaire de la réalisation des études imposées par la réglementation. A un rythme plus fréquent, "au quotidien", l'évaluation est effectuée sur la base des visites et examens visuels périodiques et, lorsqu'il existe, du suivi des mesures d'auscultation, ces éléments étant par ailleurs réexaminés lors de diagnostics plus approfondis. Une des spécificités des mesures d'auscultation, par rapport aux mesures et essais de reconnaissance, est leur répétitivité, permettant de suivre les évolutions de l'ouvrage, par une analyse spécifique.

Pour différentes raisons exposées dans la suite de cette communication, les digues de protection ne sont généralement pas équipées de dispositifs d'auscultation dont l'adaptation nécessite des réflexions particulières. Il est néanmoins intéressant de considérer dès à présent comment concevoir une auscultation appropriée à ce type d'ouvrages de manière à en effectuer un suivi temps réel le plus efficace et précis possible. A ce titre, nous examinerons successivement les pratiques actuelles en matière d'auscultation des digues de protection - sur la base d'une enquête auprès de gestionnaires d'ouvrages - et les techniques a priori les plus intéressantes pour ce type d'ouvrages : des mesures hydrauliques (piézomètres, drains), des mesures

topographiques (Lidar), des mesures de débit et de déformation à partir de fibre optique et des mesures géophysiques. Une grille d'analyse récapitulative est présentée en conclusion.

2. SPECIFICITES DES DIGUES VIS-A-VIS DE L'AUSCULTATION

Les digues sont, par définition, des ouvrages à long linéaire. Celles édifiées dans le cadre de la défense contre les inondations - objets du présent article – sont, en France tout au moins, anciennes (19^{ième} siècle) à très anciennes (Moyen Âge) dans leur grande majorité, c'est-à-dire construites par simple mise en œuvre de remblai (« levées de terre »), souvent en plusieurs étapes successives (raccordements de tronçons non contigus et/ou rehaussements), sans étude géotechnique préalable et en l'absence d'engin mécanique lourd - le compactage ayant été inexistant ou réalisé par le simple passage de bêtes de somme. Les zones d'emprunt les plus proches ont été logiquement privilégiées – même si elles ne répondaient pas au meilleur critère d'étanchéité voulu – quand les digues n'ont pas été purement et simplement terrassées en déblai-remblai ! Fragiles ou sujettes à d'inévitables surverses, les levées ont en outre subi de nombreuses brèches, ayant endommagé leur fondation et qui ont été plus ou moins bien réparées.

Constituant un obstacle entre le cours d'eau et la plaine agricole ou les zones urbaines, les digues fluviales sont traversées par de multiples canalisations de prise ou de rejet d'eau : par exemple, le SYMADREM dénombre pas moins de 300 ouvrages traversants sur ses quelque 200 km de digues camarguaises. Par ailleurs, la position dominante de levées par rapport aux terrains inondables riverains les rend attractives pour l'installation - dans le sens longitudinal cette fois-ci – de réseaux enterrés électriques, téléphoniques, d'assainissement, etc. ou encore d'une chaussée routière en crête : autant d'ouvrages qui ne contribuent pas aux fonctions de protection de la digue, mais dont, au contraire, les exigences de construction ou d'exploitation sont susceptibles d'altérer les qualités de la levée. Les digues maritimes présentent des fragilités analogues quoiqu'en relativement moindre proportion tout au moins pour ce qui est de la présence des ouvrages traversants.

Au final et à la différence de nombreux barrages, les remblais de nos digues de protection sont en général très hétérogènes, avec des variations à l'échelle potentiellement métrique, voire décimétrique ou même centimétrique dans le sens vertical, qui multipliées par la grande longueur de l'ouvrage rendent particulièrement difficile et peu viable la détection – puis le suivi d'auscultation – de toutes les singularités potentiellement dangereuses pour la structure.

A contrario, leur hauteur est, sauf rare exception, inférieure à 7 m et leur fondation ne supporte finalement qu'une charge hydraulique modérée (et, de plus, transitoire), équivalente à celle des très petits barrages. Toutefois, les fondations sont elles aussi potentiellement hétérogènes - puisque toujours constituées, au moins sur les premiers mètres supérieurs, de sols de dépôts fluviaux ou marins - et n'ont en général pas fait l'objet de traitement particulier à la construction. Enfin, le flux des écoulements dans ces fondations peut changer de direction plusieurs fois par an pour les digues fluviales et jusqu'à deux fois par jour pour les digues maritimes, entraînant un comportement particulier vis à vis des mécanismes d'érosion interne.

Pour les ouvrages hydrauliques en remblai de faible hauteur à charge permanente, typiquement les petits barrages d'irrigation ou d'AEP, l'auscultation repose prioritairement sur le jaugeage des débits de fuite, couplé au suivi de la cote du plan d'eau. Ce type de mesure – à condition que le réseau de drainage ait été conçu en conséquence – présente l'avantage d'être intégrateur par rapport à des mesures piézométriques qui revêtent un caractère ponctuel. Néanmoins idéalement, il reste préférable de disposer à la fois de mesures de débit et de mesures de piézométrie, afin de mieux interpréter les phénomènes à l'œuvre en cas de comportement anormal.

L'auscultation débitmétrique n'est pas chose aisée pour les digues de protection et ce, pour quatre principales raisons :

- elles ne sont que très peu à avoir été dotées d'un système de drainage permettant de collecter et rassembler les débits ;
- elles ne subissent qu'une charge hydraulique temporaire qui, entre deux crues ou tempêtes, peut laisser un éventuel réseau de drainage inusité – et en proie à l'oubli ou au manque d'entretien – pendant des années ou des dizaines d'années ;
- le jour – ou la nuit ! – de la crue, les opérateurs traditionnels (garde-digues) sont mobilisés par l'organisation des équipes d'appui et des interventions d'urgence et ne trouvent guère le temps de jauger des débits de fuite ou de drainage quand bien même la digue est équipée de dispositifs appropriés ;
- si mesures traditionnelles il y avait, elles seraient en trop faible nombre (couples « débit de fuite / cotes cours d'eau ») pour permettre des traitements statistiques à conditions constantes.

Ceci explique pourquoi la réglementation de 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques n'a pas imposé l'installation de dispositif d'auscultation, même pour les digues de protection de classe A ou B.

En définitive et à défaut d'avoir pu surveiller ou ausculter la digue à l'occasion d'une crue ou d'une tempête, il est très difficile d'apprécier son niveau de vieillissement interne sans avoir recours à des moyens d'investigation lourds relevant d'une démarche de diagnostic.

Dans ce contexte et après avoir rapporté et commenté les résultats d'une enquête originale auprès de plusieurs gestionnaires, nous proposons et commentons en dernière partie du présent article quelques pistes qui pourraient permettre d'intégrer des appareils d'auscultation dans un dispositif de suivi des digues de protection.

3. ETAT DES LIEUX DES PRATIQUES ET BESOINS DES GESTIONNAIRES

3.1 Panorama des pratiques d'auscultation actuelles sur les digues

Le fait que les digues fluviales et maritimes ne soient pas soumises à une obligation réglementaire d'auscultation n'incite pas leurs gestionnaires à mettre en place ce type d'outil.

Dans le but d'établir une première évaluation de l'état des pratiques d'auscultation des digues de protection contre les submersions, nous avons effectué une enquête écrite sommaire auprès d'environ 30 gestionnaires de digues répartis sur l'ensemble du territoire national. Compte tenu du faible temps imparti, nous n'avons reçu que peu de réponses écrites et avons dû compléter ce mode de consultation par des entretiens téléphoniques directs qui nous ont permis d'obtenir finalement un taux de réponse de l'ordre de 50%.

Les commentaires porteront donc sur les résultats d'un sondage plus que d'un recensement à caractère exhaustif. Néanmoins, des informations précieuses sur les motivations ainsi que sur les principales attentes des gestionnaires ont clairement pu être identifiées à cette occasion, ce qui permet d'ouvrir des pistes de réflexion quant à l'avenir et aux modalités de développement de l'auscultation dans le domaine des digues de protection.

3.1.1 Le questionnaire

Le questionnaire, à caractère essentiellement technique et opérationnel, qui a été envoyé aux gestionnaires de digue comportait trois parties précédées d'un court texte introductif :

- la première permettait d'identifier et de caractériser sommairement la structure de gestion concernée par l'enquête ;
- la seconde dressait un bilan des pratiques d'auscultation actuelles des ouvrages pris en gestion par la structure ;
- la troisième portait sur les attentes et éventuelles suggestions d'amélioration des pratiques en matière de surveillance des digues.

Ce questionnaire a également servi de canevas aux entretiens téléphoniques, sans pour cela limiter l'expression des interlocuteurs lorsque ces derniers souhaitaient compléter, préciser ou nuancer certaines parties de leurs réponses.

3.1.2 Représentativité des structures consultées

Les gestionnaires qui ont accepté de nous répondre se répartissent de manière relativement homogène sur l'ensemble du territoire national et s'occupent d'ouvrages situés le long des principaux cours d'eau français (Seine, Loire, Rhône, Saône, Doubs, Adour, Durance, etc.) ainsi qu'en domaine côtier (presqu'île de Noirmoutier).

Ils disposent de statuts juridiques variés allant des associations syndicales aux services départementaux dépendant de l'Etat en passant par les syndicats mixtes ou les Etablissements Publics. Leur ancienneté est également très variable, pouvant excéder cinquante ans ou se réduire à quelques années d'existence en cas de création récente ou de prise de nouvelles compétences.

En résumé, malgré le faible nombre de réponses qu'il a suscité, les résultats de ce sondage donnent une image somme toute relativement fidèle de la réalité du développement actuel des systèmes d'auscultation des digues fluviales ou maritime dites « sèches » à l'échelon métropolitain. Nous en avons restitué l'essentiel en distinguant les aspects équipements, des pratiques d'exploitation et des perspectives ou attentes des gestionnaires.

3.1.3 Réponses concernant les équipements actuels

Les réponses obtenues par voie orale ou écrite permettent de se faire une idée générale de l'état de diffusion des différents types de dispositifs d'auscultation des digues de protection contre les submersions en 2012.

Cet état qui peut se résumer par la liste suivante :

- . Repères de nivellement et suivi géodésique : assez rares sous forme de bornes repères (Seine et Rhône aval) mais en projet (Noirmoutier, Saône-Doubs).
- . Limnigraphes/capteur de niveau d'eau de surface : un gestionnaire en possède en raison d'un besoin de gestion dynamique de l'écrêtement des crues.
- . Capteurs de pression en amont d'ouvrages mobiles.
- . Piézomètres avec ou sans enregistreur : ce type de dispositif est le plus fréquent (6 cas) et se trouve amené à se développer en profitant des reconnaissances liées aux diagnostics ou aux travaux de confortement (4 cas). En revanche, les mesures régulières sont rares (1 cas) et les mesures en crue n'ont pu être réalisées.
- . Fibre optique : un site pilote en val d'Authion avec un linéaire équipé de l'ordre de 800 m avec une fibre de mesure de déformations intégrée à une nappe géotextile. Pas d'exploitation dans le cadre du système de gestion de la sécurité. A des fins opérationnelles, le SYMADREM a prévu d'installer une fibre optique de détection thermique dans ses travaux de confortement du Rhône entre Beaucaire et Fourques en rive droite (cf. 4.3 ci-après) ainsi qu'entre Tarascon et Arles en rive gauche soit un linéaire total de près de 30 km.
- . Capteurs de pression interstitielle : aucune mention au cours des entretiens téléphoniques.
- . Levés aériens LiDAR (laser) : près d'un gestionnaire questionné sur deux dispose d'au moins un levé LiDAR mais n'envisage pas pour autant d'assurer un suivi topométrique par passages réguliers, sauf dans le cas de mouvements karstiques en fondation.

3.1.4 Réponses concernant les pratiques actuelles d'exploitation des dispositifs d'auscultation

Hors période de crue :

Quelques gestionnaires assurent un relevé manuel régulier ou ponctuel de leur réseau de piézomètres, ce qui permet de connaître l'évolution du niveau piézométrique dans la fondation des ouvrages mais ne donne aucune information quant à l'état de saturation du corps de digue. Ce type de relevé n'est pas obligatoirement associé aux visites programmées avec mention des mesures dans les consignes écrites, ce qui devrait néanmoins être le cas.

Aucune mesure sur fibre optique n'a été mentionnée y compris lorsqu'existe un système de capteurs en place. Cela est probablement dû à la forte différence de coût relatif entre les capteurs (la fibre optique, faible coût d'installation si celle-ci est associée à un confortement par recharge) et la centrale d'acquisition (appareillage électronique de très faible diffusion, coût élevé aujourd'hui).

En crue

A ce jour, aucune mesure piézométrique en crue n'a pu être réalisée sur des piézomètres situés dans le corps des digues équipées à cet effet. Les raisons en sont nombreuses parmi lesquelles on peut retenir :

- Absence de crue suffisamment forte depuis la mise en place des piézomètres (cas du Rhône aval pour les piézomètres installés après 2003).
- Pas d'enregistrement en continu permettant de garantir la prise de mesure en cas de phénomène de courte durée.
- Pas de moyen humain en période de crise pour assurer ce type de tâche jugée non prioritaire.

Aucun autre type de dispositif en place dans les digues (fibre optique) n'a fait l'objet de mesure en période de crue.

3.2 Perspectives d'évolution et attente des gestionnaires

Comme ils nous l'ont bien souvent rappelé à l'occasion de l'enquête, les acteurs opérationnels de la sécurité des digues ont à faire face à de multiples obligations nouvelles depuis l'entrée en vigueur du décret de décembre 2007 :

- . Réintégrer les digues « orphelines » au sein du patrimoine géré dans les limites du territoire de compétence.
- . Constituer les dossiers réglementaires des ouvrages hydrauliques classés au titre du décret.
- . Assurer l'entretien et le suivi courant de ces ouvrages en conformité avec les différentes réglementations.
- . Programmer les travaux de confortement nécessaires à la garantie de la performance des ouvrages hydrauliques.

Si le développement de dispositifs d'auscultation ne semble pas faire partie des priorités actuelles de ces structures publiques, des opportunités de réalisation d'équipements pouvant s'intégrer à de futurs systèmes d'auscultation sont néanmoins présentes dans le cadre de reconnaissances géotechniques, de développement de bases de données (SIG) ou de projets de confortement.

Les réflexions débutent le plus souvent au stade de la conception des ouvrages neufs ou des travaux de confortement et s'appuient de plus en plus sur la force de proposition des bureaux d'études ou des organismes de recherche.

3.2.1 Reconnaissances géotechniques

Plusieurs gestionnaires se sont déclarés favorables à profiter des campagnes de reconnaissance géotechnique nécessitées par les besoins des diagnostics approfondis pour mettre en place des piézomètres, capteurs à corde vibrante ou capteurs de pression. En revanche, l'installation de système d'enregistrement avec ou sans télétransmission ne semble pas à l'ordre du jour pour l'instant.

3.2.2 Base de données/SIG

Ce type d'outil de gestion suppose la pose de bornes repères spécifiques. Là encore, des matériels adaptés (repères équipés de cibles ou antennes GPS) peuvent s'intégrer à un dispositif de contrôle géodésique par triangulation et arpentage permettant de détecter certaines évolutions topographiques fines de la crête de digue. Dans certaines régions, les services de contrôle commencent à demander la mise en place de ce type de dispositif. Il conviendrait de s'assurer qu'ils sont appropriés en regard de l'ampleur des mouvements attendus ou suspectés.

3.2.3 Travaux de confortement (ou reconnaissances associées).

Il s'agit du principal vecteur de développement des dispositifs d'auscultation sur digue sèche. A titre d'exemple : les principales réalisations ou projet à court terme de pose de fibre optique sont associés à des travaux de confortement. En effet, le coût de ces équipements est marginal par rapport au budget global de travaux, ce qui relativise la contrainte économique.

La pose de piézomètres (sans appareil enregistreur), voire la création de drains, semble également facile à intégrer à un programme de travaux, ou parfois même de reconnaissances, pour de nombreux gestionnaires.

Les autres types de dispositif d'auscultation n'ont pour l'instant pas fait l'objet de réflexions suffisamment abouties.

3.2.3 Utilisation des levés LiDAR.

La plupart des gestionnaires questionnés disposent d'un levé topographique de base de leurs ouvrages par une méthode LiDAR (ou Laser), mais à l'évidence ce n'est pas le cas des gestionnaires des petites digues, sous-représentés dans notre enquête alors qu'ils sont majoritaires sur le terrain. Un suivi des déformations par comparaisons de modèles numériques de terrain à des dates de levés espacés dans le temps ou légèrement postérieurs à une crue importante, constitue un moyen de suivi périodique des mouvements de sol qui peut entrer dans le cadre de l'auscultation (cf. § 4.2.2 ci-après). Ce type de méthode peut s'avérer tout particulièrement indiqué aux cas d'instabilité de la couche géologique de fondation des ouvrages (sol compressible ou karst).

3.3 Conclusions partielles

Une enquête même sommaire auprès des responsables de digue apporte des enseignements précieux lorsqu'il s'agit de cerner l'état d'une pratique encore en phase de « décollage ». Les réponses que nous avons reçues sont globalement concordantes et relativement conformes à la perception générale des différents acteurs de ce secteur d'activité.

Aujourd'hui l'auscultation des digues sèches fluviales ou maritimes demeure une pratique marginale en France pour plusieurs raisons souvent avancées par les gestionnaires eux-mêmes, à savoir par ordre de fréquence :

- . L'absence de besoin immédiat compte tenu de la rareté des sollicitations hydrauliques sur ces ouvrages, associée à un ordre de priorité faible par rapport aux autres interventions à la charge du gestionnaire.
- . Le coût et les modes de financement envisageables encore peu ou mal identifiés, à mettre en face des faibles ressources financières du « gestionnaire moyen ».
- . Le manque d'information sur des technologies nouvelles parfois en phase d'évolution rapide (fibre optique par exemple).
- . Le manque de retour d'expérience ainsi que la prudence en matière d'innovation tant que des expériences positives nombreuses et en vraie grandeur ne sont pas venues rassurer les maîtres d'ouvrages potentiellement intéressés.

En définitive, l'enquête montre aussi que la voie est ouverte vers une première phase de développement des dispositifs d'auscultation des digues. En effet, des réflexions portant sur l'opportunité d'intégrer une mesure d'auscultation commencent à se faire jour chez de nombreux gestionnaires, au moins au stade de la conception des travaux de confortement. Les réalisations concrètes de dispositifs d'auscultation au cours des prochaines années peuvent déclencher un effet « boule de neige » en s'appuyant sur le rôle d'incitation des bureaux d'études et des organismes de recherche et sur le regroupement (à encourager) des structures gestionnaires qui permettra de dégager plus de moyens.

En revanche, il paraît d'ores et déjà assuré que les systèmes d'auscultation se cantonneront principalement aux ouvrages et sites à fort enjeu (digues classées A ou B). Il s'agira également préférentiellement de parties construites, mais des éléments naturels associés à certains systèmes d'endiguement (ex : les dunes en zone côtière, les berges de rivière, ...) peuvent justifier un suivi de leur déplacement ou de leur évolution pour lequel les dispositifs LiDAR sont a priori adaptés.

4. DISPOSITIFS D'AUSCULTATION ENVISAGEABLES

4.1 Piézométrie et débits de drainage

Classiquement, les mesures d'auscultation relatives à l'hydraulique interne des ouvrages en remblai concernent des niveaux piézométriques et des mesures de débit de drainage. Le suivi dans le temps de ces types de mesure permet d'approcher le comportement de l'ouvrage ainsi que les éventuelles dégradations (érosion interne, risque de glissements, ...) et leurs causes (dégradation des performances en termes d'étanchéité ou de drainage). Il est tout à fait envisageable d'équiper des digues de protection contre les inondations ou les submersions marines de ce type de dispositif, les réelles difficultés étant plus de l'ordre de la réalisation des mesures elles-mêmes (nombre élevé, compte tenu du linéaire considéré) et de celui de leur interprétation (faibles périodes de sollicitation).

4.1.1 Piézométrie

La réalisation de piézomètres n'a pas de spécificité par rapport aux barrages. La mesure peut de la même manière se faire soit avec une sonde manuelle, soit à l'aide d'un capteur de pression. Toutefois, on évitera les sondes de pression pour ausculter les corps de digue – soumis à des cycles de saturation-désaturation - et on les réservera aux terrains de fondation toujours saturés. On peut profiter de reconnaissances (sondages) sur une digue pour installer un piézomètre à demeure.

Il est intéressant de disposer de profils piézométriques, comprenant des piézomètres successifs le long d'un profil en travers de l'ouvrage, dans l'ouvrage et dans sa fondation, sous l'ouvrage mais aussi de part et d'autre. Le suivi des évolutions du niveau piézométrique de la fondation est particulièrement pertinent, car ces variations seront plus marquées que celles du corps de l'ouvrage proprement dit, compte tenu de la plus fréquente circulation d'eau et du fait que les digues sont le plus souvent construites sur des fondations "naturelles", à la différence des barrages.

4.1.2 Débits de drainage

A priori, il va être très difficile d'organiser la mesure de débits de drainage sur des digues de protection longues de plusieurs (dizaines de) kilomètres. Malgré cela, lors de confortements, il est fréquent de réaliser des remblais avals drainants ou a minima avec un drain de pied. Il semble donc dommage de ne pas créer alors simultanément les éléments matériels permettant la mesure des débits drainés (caniveaux, seuils, ...). Sans vouloir systématiser les mesures, le suivi ponctuel pendant les épisodes où la digue sera sollicitée, visuellement dans un premier temps puis avec mesures rapprochées là où on constate des fuites lors d'une crue suffisamment longue, permettra éventuellement d'établir un diagnostic d'urgence.

4.1.3 Analyse, interprétation

Comme pour les barrages, il est intéressant pour effectuer l'analyse de ces mesures de disposer parallèlement des mesures de niveau de l'eau côté rivière ou mer et d'un suivi de la pluviométrie. Bien entendu, la représentativité de l'analyse par des méthodes numériques ne sera pas facilitée par la faible période de sollicitations. En revanche, la dispersion le long du linéaire permettra de repérer des tronçons avec des comportements différents et donc d'identifier les secteurs à risque.

4.2 Lidar haute résolution

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté permet d'acquérir des données topographiques sous la forme de nuages de points 3D géo-référencés. Cette technique d'acquisition par balayage laser est aujourd'hui utilisée de façon courante pour étudier la topographie du lit majeur des fleuves et rivières [4.2.1] : 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 / m², ce qui est suffisant pour construire un 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 relativement 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 m². On déploie alors des systèmes hélicoptés haute résolution, évoluant à basse altitude (100 à 300 m).

4.2.1 Un exemple de système d'acquisition topographique laser hélicopté haute résolution : FLI-MAP

FLI-MAP (Fast Laser Imaging and Mapping Airborne Platform) est un système laser altimétrique hélicopté, développé par Fugro-Geoid. Dans sa version la plus récente (FLI-MAP 400, 2010), la plateforme de mesures embarquée dans l'hélicoptère est équipée d'un distancemètre 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 (Fig. 1), de deux récepteurs GPS mobiles bi-fréquence pour le post-traitement, d'un système de positionnement temps réel, d'une unité de mesure inertielle (UMI) interfacée sur un système de navigation inertiel intégré (SINI) 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. 1b.).

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

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 de 80 points/m² ;
- une précision absolue en X, Y de 5 cm et de 3 cm en Z en conditions favorables, s'approchant du centimètre en relatif pour le Z ;
- une résolution d'imagerie de 25 mm au sol sur un corridor de 120 m.

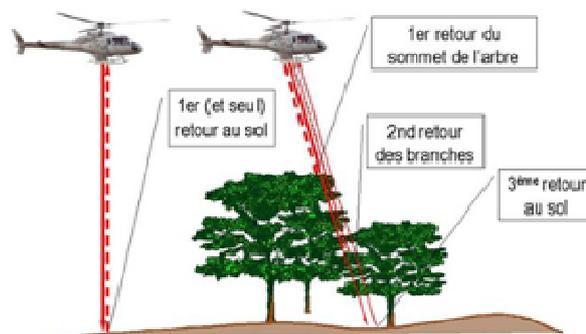
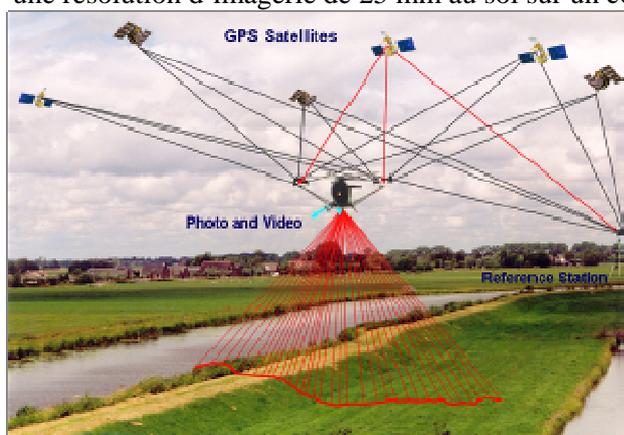


Figure 1 : Principe de fonctionnement du système LiDAR hélicopté FLI-MAP.

Fig. 1a (à gauche) : Positionnement GPS temps réel et angle de scan transversal.

Fig. 1b. (à droite) : Illustration de deux des trois plans de balayage dans le sens du vol. (sources FUGRO-GEOID).

4.2.2 Du levé topographique à l'auscultation topométrique

Le LiDAR aéroporté sert d'abord, comme tout système d'acquisition topographique, à construire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des Modèles Numériques d'Élévation (NNE) des territoires survolés et à élaborer des plans et profils topographiques des aménagements présents ou de leurs emprises. Il est bien adapté aux ouvrages ou infrastructures à long linéaire (voies ferroviaires, lignes électriques, ...) du fait de son mode de levé en "corridors" et de son haut rendement in situ.

Il se révèle aussi particulièrement intéressant pour le levé des digues de protection, notamment celles où la présence de végétation envahissante gêne - et donc rend 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 / m²), 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 [4.2.2] grâce à un traitement adéquat des points que celle-ci justement intercepte (cf. fig. 4.2.1 b. et 4.2.2). A l’appui des images aériennes haute résolution que certains opérateurs proposent en complément du levé laser, le LiDAR hélicopté haute densité devient ainsi un outil précieux pour contribuer au diagnostic des digues [4.2-3] et permet de produire des plans topographiques de qualité, dont la précision et la richesse constituent des atouts intéressants pour l’exploitation et le suivi des ouvrages (repérage sur le terrain, implantation des sondages et travaux, etc.).

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 hélicopté 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.

4.2.3 *Suivi morphologique*

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 faisant 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 précisément 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, à condition toutefois que ce lit soit peu profond (en effet, les rayons laser des LiDAR topographiques classiques ne pénètrent pas dans l’eau) ;
- de dépôts torrentiels (évaluation de la recharge ou du déficit sédimentaire d’une campagne à l’autre) [4.2-4] ;
- des principales érosions de berge.

Une telle approche peut être étendue aux digues maritimes.

Dans ces applications à objectif morphologique, il faut trouver un compromis entre la précision souhaitée (le décimètre suffit en général) et la largeur du corridor à survoler, qui est 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).

4.2.4 *Cartographie quantitative et 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, nous l’avons vu, de caractériser et de cartographier la végétation ligneuse présente sur la digue ou à ses abords (cf. fig. 4.2.2). 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 végétalisées, 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 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.

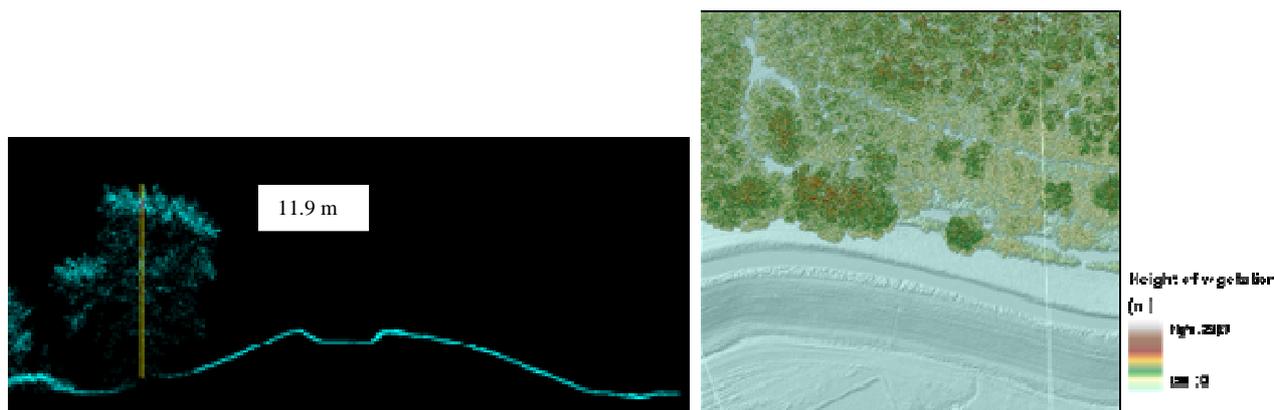


Figure 2 : Caractérisation en coupe et en plan de la végétation de bord de digue à l'aide des outils LiDAR (source : projet FloodProBE, site pilote du Val d'Orléans)

4.2.5 Limites

La technologie LiDAR aéroportée présente les principales limites suivantes vis-à-vis de l'auscultation des digues :

- 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 (cher 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 inmanquablement affecte la densité de points arrivant au sol et donc la précision finale. Un suivi altimétrique fin en vue de détecter des tassements centimétriques n'est ainsi envisageable que si les surfaces visées sont dénudées et régulières.

Les rendements in situ des acquisitions LiDAR héliportés 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 2000 euros / km, avec fourniture de profils en long et plans topographiques et de l'ensemble des produits d'imagerie aérienne que l'on n'a évidemment pas avec une topographie uniquement terrestre.

4.3 Techniques d'auscultation à base de fibre optique : projet de mise en place d'une fibre optique sur deux tronçons de digue confortés en Camargue

4.3.1 Hétérogénéité des digues de Camargue et programme de confortement entre Beaucaire et Arles

Les digues de Camargue ont été construites dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle après les grandes crues de 1840 et 1856, dont les périodes de retour sont multiséculaires. Les ouvrages ont construits en lieu et place d'autres ouvrages plus anciens. Compte tenu de leur mode de réalisation (compactage avec des dames de 15 kg) et de leur composition très hétérogène (alternance limons/sables), les digues de Camargue sont exposées en période de crues, au risque de brèches par érosion interne. Ainsi, les crues de 1993, 1994, 2002 et 2003 ont montré que les digues pouvaient céder bien avant que l'eau n'atteigne la crête.

Suite aux inondations causées par la crue majeure du Rhône de décembre 2003, qui ont touché plus de 12 000 personnes sur l'ensemble du delta du Rhône et occasionné plus de 700 millions d'euros de dommages, les pouvoirs publics ont engagé un vaste plan de lutte contre les inondations, intitulé « Plan Rhône ». C'est dans ce cadre que le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digues du Delta du

Rhône et de la Mer (SYMADREM), responsable d'un parc de 230 km de digues fluviales et maritimes a établi un programme de sécurisation de ces ouvrages.

Entre Beaucaire et Arles, ce programme prévoit :

- 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 dites « milléniales » calées 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 à base de fibre optique suivant les préconisations faites par le programme RGCU HYDRODETECT réalisé en 2008.

4.3.2 Spécifications générales du dispositif de fibre optique

L'objectif de cette fibre optique est d'effectuer des mesures de températures et de déformation pour 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 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 le système radio-numérique (système TETRA) également en cours de mise en œuvre.

Ce choix a été motivé sur la base des critères suivants :

- à l'exception d'une d'entre elles, toutes les brèches occasionnées dans les digues du Petit Rhône lors des crues de 1993, 1994, 2002 et 2003 ont été initiées par érosion interne ;
- la forte hétérogénéité des matériaux constituant les digues (alternances sables/limons) et leur tendance à la fissuration et à la déstructuration sous l'effet de turbulence mis en exergue lors du diagnostic approfondi de la digue
- le faible pourcentage du montant du dispositif d'auscultation au regard du montant à investir pour la sécurisation des ouvrages
- l'importance des enjeux dans la zone protégée (110 000 personnes) et la classe A des digues

4.3.3 Insertion du dispositif dans le tronçon conforté de digue rive droite du Rhône en amont de Fourques

Le tronçon de digue rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques qui sera équipé sur 13 km de fibre optique dès 2013, n'a pas subi de brèches lors de la crue de décembre 2003, mais a été néanmoins en limite de surverse sur une grande partie de son linéaire (Fig. 3) et a fait même l'objet de déversements très localisés qui ont pu être maîtrisés par des interventions d'urgence.



Figure 3 : Digue rive droite de Fourques en limite de surverse lors de la crue de décembre 2003 (crédit photo : Paul Royet – Irstea).

La synthèse des différents essais de perméabilité normalisés ou expérimentaux (Nasberg, Perméafor, essai de dissipation, utilisation d'une sonde Lugeon pour mise en pression d'un essai Lefranc) et essais d'érosion (JET, HET) effectués dans le cadre du diagnostic approfondi de ce tronçon de digue a mis en évidence la forte variabilité de perméabilités mesurées des matériaux en fonction de la charge et de la durée des essais. Ces variations de mesures difficilement explicables, selon les bureaux d'études ISL/Fugro géotechnique et le collège d'experts du SYMADREM, pourraient provenir d'une tendance forte à la déstructuration du matériau constitutif de la digue ou de sa fondation, plus ou moins révélée par les essais. Si le sol passe de l'état non saturé à l'état saturé fissuré sous l'effet de la charge hydraulique et des variations de pression inhérentes à certains essais (Perméafor ou essai type Lugeon), les essais concernés concluent à une perméabilité forte et à une tendance à l'érosion interne, voire à la liquéfaction.

Pour pallier ce risque potentiel d'érosion interne du sol de digue ou de fondation, le bureau d'études a proposé un confortement des ouvrages en place avec réalisation d'un remblai drainé (matériaux drainants encadrés par deux filtres) sur le talus côté val avec une couche d'encrochements bétonnés en sus pour les tronçons de digue résistant à la surverse. Le schéma de principe des travaux (Fig. 4) ci-après.

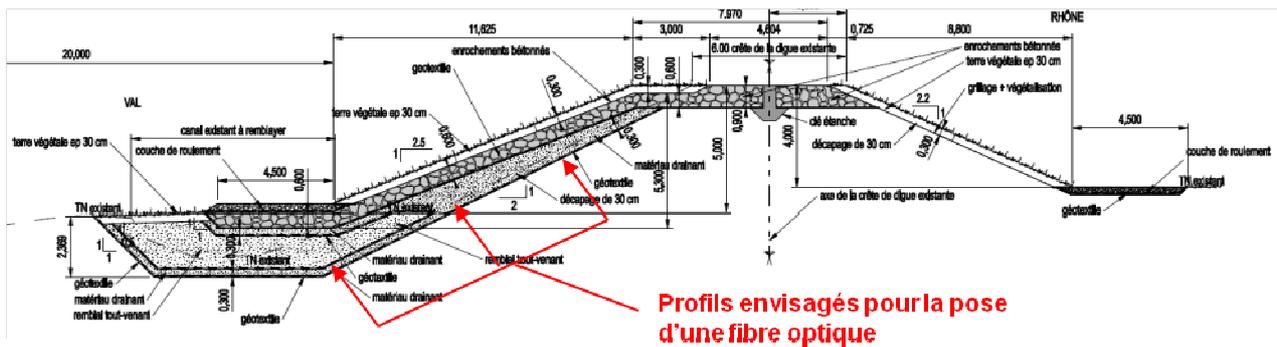


Figure 4: Schéma de principe de la digue résistante à la surverse (source ISL)

C'est dans le remblai drainé côté val que sera installé le dispositif de fibre optique.

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 d'investissement. Ce dispositif à base de fibre optique permettra d'avoir une surveillance continue de l'ouvrage, même en cas de surverse.

4.4 Tomographie de Résistivité Electrique : expérimentation de suivi temporel sur le long terme par instrumentation à demeure

La DDT 49 est responsable du plan de surveillance des levées de la Loire en Maine-et-Loire. Pour la surveillance en période de crue, classiquement réalisée par examen visuel, le gestionnaire recherchait des méthodes de surveillance automatisées afin de disposer à terme d'un système d'alerte en temps réel. Le LRPC d'Angers et l'IFSTTAR ont alors proposé la mise en œuvre d'une expérimentation géophysique sur le long terme comprenant notamment la pose d'instrumentation à demeure pour le suivi temporel d'une portion de levée par Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).

L'objectif de l'expérimentation était de réaliser un suivi sur plusieurs années, de montrer que la TRE peut contribuer efficacement à un système global de surveillance et d'alerte. Les techniques basées sur la TRE sont désormais très largement considérées comme pertinentes pour le diagnostic et la surveillance de l'état interne des ouvrages hydrauliques [Fig. 5] [4.4-2] [4.4-3] [4.4-4]. Elles sont sensibles à des variations d'état des matériaux constitutifs des corps de digues. Ces variations, comparées à des critères d'érodabilité et de stabilité des sols, pourraient alors aider le processus de prise de décision. La TRE est classiquement déployée de manière non intrusive, à partir de la surface. Pour assurer une meilleure qualité du suivi temporel, c'est une instrumentation à demeure qui a été proposée ici. De plus, afin de se rapprocher d'une vision 3D des variations internes de l'état du corps de digue, il a été décidé d'installer 2 lignes parallèles d'électrodes sous la crête de la levée [4.4-5].

La portion de levée sélectionnée pour l'expérimentation est située dans le val de l'Authion en aval de Saumur. On sait que le val d'Authion est plus fréquemment et fortement sollicité par les crues que les régions plus en amont de la Loire. Une portion longue de 800 m de la levée avait déjà été équipée du système Tencate GeoDetect® (réseau de fibres optiques intégré à un géosynthétique). La portion équipée est en contact direct avec la Loire et fortement soumise aux courants, et au moins trois points d'infiltrations ont été observés lors d'une crue en 1999. Ce secteur était donc intéressant à plusieurs titres pour des expérimentations, en lien avec le projet ERINOH. La portion de levée choisie pour l'instrumentation de TRE, longue de 100 m, est située à l'intérieur de ce linéaire de 800 m.

Sur cette portion, la hauteur moyenne de l'ouvrage est de 4 à 6 m côté val et de 6 à 8 m côté Loire. Le corps de digue est constitué de limons et de sables. Il présente une certaine hétérogénéité liée à l'historique de l'ouvrage, qui a été mise en évidence par les différents sondages géotechniques. Le substratum (craies du Turonien) se situe à une profondeur variant de 10 à 16 m. Il est recouvert par les alluvions de la Loire.

En novembre 2008, deux tranchées ont été réalisées pour installer les lignes d'électrodes longitudinalement à la levée, dans le matériau de digue, sous les couches de chaussée de la route départementale et à environ 1,20 m sous le niveau de la crête (Fig. 5). Chaque ligne est composée de 48 électrodes espacées de 2 m. Les lignes ont été écartées entre elles de près de 4 m pour favoriser l'objectif de représentation 3D visé à terme. Lors de la pose, les électrodes ont été repérées à l'aide d'un GPS de précision centimétrique.



Figure 5 : Vues de l'installation des lignes d'électrodes sous la chaussée : tranchées côté val (à gauche), côté Loire (au centre) et repérage au GPS (à droite).

La première phase de suivi temporel a été menée à un rythme mensuel, de fin 2008 à mi-2010, et une analyse des résultats a été réalisée [4.4-6]. Grâce à la stabilité des contacts électriques au niveau des électrodes installées à demeure, les mesures ont montré une très bonne qualité. Un exemple type des coupes de résistivité obtenues après inversion est présenté (Fig. 6) Ces coupes montrent une couche de remblai de résistivité modérée (moins de 100 Ohm.m) et d'épaisseur 5 m environ, sur des couches d'alluvions plus conductrices et présentant localement de fortes anomalies.

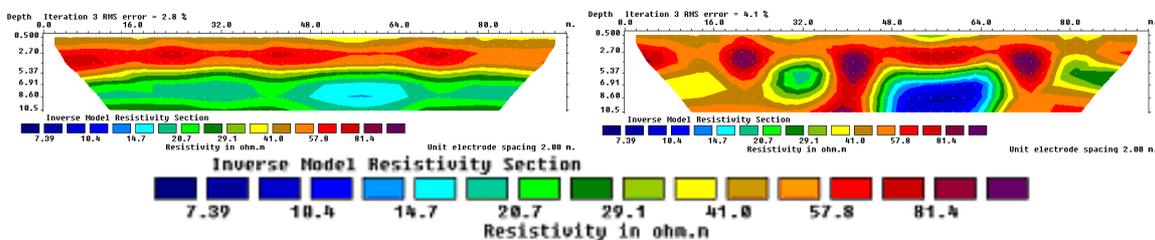


Figure 6 : Coupes de résistivité inversée obtenues en mai 2009 à partir des lignes d'électrodes enfouies côté val (à gauche) et côté Loire (à droite).

L'analyse des variations temporelles a montré que ces zones d'anomalies conductrices étaient elles-mêmes le siège des variations de résistivité les plus significatives au cours de cette période (Fig. 7) et en particulier côté Loire, dans la zone comprise entre les abscisses 44 et 68 m, et entre 5 et 10 m de profondeur. Il est à noter qu'il y a eu, durant cette période, des variations saisonnières du niveau de la Loire et de la nappe, mais pas de crue. Ces variations montrent des corrélations globales avec les variations de résistivité observées figure 4.4-3, mais avec des différences locales notables. Ces résultats ont posé la question du comportement de cette zone « singulière », mais également d'éventuelles perturbations des mesures, ainsi que de la fiabilité des coupes de résistivité inversée, obtenues ici par une approche 2D classique. Ce dernier point a fait l'objet de développements [4.4-7] dont les avancées permettront de tenir explicitement compte de la nature 3D du problème. Les teneurs en eau du corps de digue, non mesurées au départ, vont maintenant être suivies grâce à une instrumentation complémentaire installée dans la zone « singulière ».

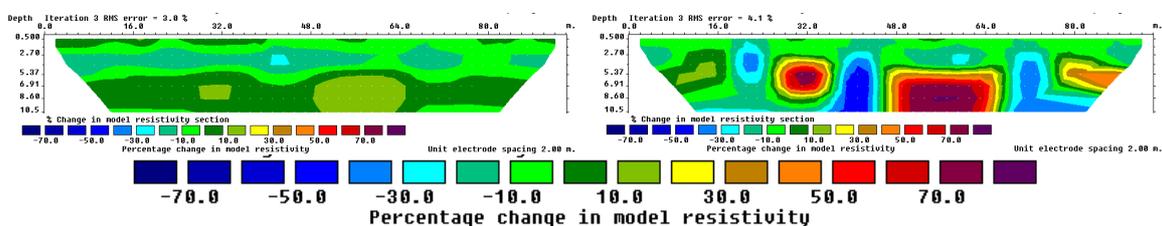


Figure 7 : Coupes des variations relatives (%) de résistivité inversée obtenues en juin 2010 par rapport à mai 2009 (à gauche : côté val ; à droite : côté Loire).

Les apports de cette phase sont multiples. Tout d'abord la capacité des techniques de TRE à imager sur le long terme l'état interne de la levée et ses variations temporelles a été démontrée. L'instrumentation à demeure a permis d'atteindre une qualité élevée et stable des mesures et l'installation de deux lignes parallèles favorise à terme une représentation en volume.

En 2011, le LRPC d'Angers a réalisé de nouveaux forages dans la zone dite « singulière », avec pose d'instrumentation complémentaire. Le suivi temporel a ensuite redémarré et va pourvoir être poursuivi sur le long terme (projet régional RS2-OSUNA). La nouvelle phase de développement visera à comprendre le comportement de la zone « singulière » (essais en place), à améliorer la fiabilité des inversions de TRE, notamment en intégrant l'information topographique, et à exploiter toutes les possibilités d'interprétation temporelle et 3D.

5. CONCLUSION

En guise de conclusion, nous proposons ci-dessous une grille de synthèse récapitulant les différentes méthodes passées en revue dans le présent article et leur applicabilité pour l'auscultation des digues de protection :

Dispositifs d'auscultation	Principe de mesure	Paramètre(s) techniques(s) de la digue pouvant être suivi(s)	Avantages	Contraintes et limites
Piézométrie	Mesure d'un niveau d'eau ou d'une pression.	Saturation du remblai. Sous-pressions en fondation.	Faible coût d'installation si équipement de sondages. Mesure simple.	Mesure ponctuelle. Nécessite de mesurer lors de la crue ou juste après. Risque de casse lors des travaux d'entretien, vandalisme.
Débits de drainage	Mesure directe d'un débit	Débit de drainage ou de fuite	Faible coût d'installation du point de jaugeage si faite à l'occasion de travaux de confortement côté val. Mesure simple.	Nécessite de mesurer lors de la crue. Entretien régulier à prévoir des points de jaugeage.
LiDAR haute résolution	Mesure de distances (à haute densité de points)	Déformations de la géométrie de la digue : tassements, glissements, ... Suivi morphologique du lit ou de l'estran au droit de la digue ou des structures naturelles participant à la protection (dunes, plages, ségonnaux, ...). Suivi de la végétation ligneuse.	Haut rendement d'acquisition in situ, adapté au long linéaire. Peut être couplé à l'acquisition d'images aériennes haute définition. Coût intéressant si linéaire > 60 km par intervention. Dispositif multifonctions.	Pas d'information sur la bathymétrie (LiDAR « classique »). Coût prohibitif si linéaire < 20 km par intervention. Perte de précision en suivi topométrique si présence de végétation ou surface irrégulière. Exploitation des données nécessitant des compétences SIG.
Fibre optique	Thermométrie. Mesure de déformation.	Détection de fuite(s). Débit de drainage. Déformation de la géométrie de la digue.	Faible coût d'installation si faite à l'occasion de travaux de confortement côté val. Dispositif potentiellement bi- ou tri-fonctions.	Mesure linéaire (le long de la fibre), nécessité de prévoir des boucles pour une mesure « surfacique ». Perturbation des mesures par la pluie. Coût élevé d'acquisition et de traitement. Viabilité à long terme et disponibilité de l'appareil de mesure à vérifier pour les digues rarement sollicitées.
TRE avec électrodes à demeure	Enregistrement de séquences de différences de potentiel générées par des injections de courant dans le remblai.	Variations du niveau de saturation du remblai et de sa fondation Détection de zones d'infiltration évolutives.	Système « peu intrusif » (si installation lors de travaux), donnant accès à une coupe « haute résolution » et pouvant ausculter jusqu'à la fondation. Coût d'installation modéré. Coût de mesure relativement faible, une fois le système en place.	Calage spécifique au cas par cas. Mesure simple mais interprétation par un spécialiste (en attendant une meilleure diffusion de la technique). Encore au stade expérimental pour une installation à demeure.

Pour permettre une analyse correcte de ces mesures d'auscultation, il convient bien sûr de ne pas omettre la nécessité de suivre, par des moyens appropriés, le niveau du plan d'eau « côté amont » (qui traduit le niveau de charge hydraulique au moment des relevés) et la pluviométrie locale.

REMERCIEMENTS

L'expérimentation LiDAR réalisée sur le site pilote du Val endigué d'Orléans dans le cadre du projet européen FloodProBE a bénéficié des soutiens financiers de la DREAL Centre, de l'U.E., de la SNCF, de Fugro-Geoid et d'Irstea.

Pour l'expérimentation dans le Val d'Authion (suivi par TRE), nous tenons à remercier David Hupin, Yannick Fargier, Sébastien Hervé, Théophile Guillon, Luc Rémon, Anaëlle Joubert, Raphaël Bénot et son équipe, Nathalie Manceau ; ainsi que nos partenaires : PN ERINOH, DDT 49, CETE de l'Ouest, DREAL Centre, Opérations de Recherche SOLEM et DOFEAS (IFSTTAR et MEDDE).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [4.2.1] 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.
- [4.2.2] 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.
- [4.2-3] Auriou, L., Mériaux, P., Lacombe, S., Marmu S., Maurin, J., Boulay, A. (2012) - *The airborne high-resolution LiDAR as an efficient tool for topographical survey and detection of surface anomalies on flood protection dike*. FloodRisk 2012 Conference, to be published.
- [4.2-4] 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)*.
- [4.4-1] Fauchard, C., Mériaux, P. (2004) - *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues*. Cemagref Editions, 124 p.
- [4.4-2] Boukalová, Z. & Beneš, V. (2008) - *Application of GMS System in the Czech Republic – Practical Use of IMPACT, FLOODSite and GEMSTONE Projects Outcomes*. FLOODrisk 2008 conference; In the proceedings, Oxford, 29 September – 3 October 2008; UK.
- [4.4-3] Niederleithinger, E., Weller, A. and Lewis, R. (2011) - *Evaluation of Geophysical Techniques for Dike Inspection: Recommendations of DEISTRUKT project*. Poster presented at the FloodProBE International Geophysics Workshop, March 21-23, 2011, Paris, France.
- [4.4-4] Palma Lopes, S., Fauchard, C., Simm, J., Morris, M.W., Royet, P. (2012) - *The FloodProBE International Geophysics Workshop: Factual report*. FP7-ENV-2009 FloodProBE project, <http://www.floodprobe.eu/>.
- [4.4-5] Palma Lopes, S., Hervé, S., Hupin, D., Bénot, R., Guillon, T. (2010) - *Suivi géophysique d'une levée de Loire dans le val de l'Authion, Rapport LC/09/ERI/37 : Actions menées d'avril 2008 à décembre 2009*. Projet National ERINOH, <http://erinoh.lyon.cemagref.fr/>.
- [4.4-6] Palma Lopes, S., Hervé, S., Hupin, D., Bénot, R., Guillon, T. (2010) - *Suivi géophysique d'une levée de Loire dans le val de l'Authion, Rapport LC/10/ERI/60 : Actions menées de janvier à juin 2010*. Projet National ERINOH, <http://erinoh.lyon.cemagref.fr/>.
- [4.4-7] Fargier, Y. (2011) - *Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 274p.