



Recommandations ERINOH (volume 2): méthodologie de diagnostic de l'érosion interne dans les digues en remblai

D. François, P. Meriaux, J. Monnet

► To cite this version:

D. François, P. Meriaux, J. Monnet. Recommandations ERINOH (volume 2): méthodologie de diagnostic de l'érosion interne dans les digues en remblai. Colloque National Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.434-442. hal-01509571

HAL Id: hal-01509571

<https://hal.science/hal-01509571>

Submitted on 18 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recommandations ERINOH (volume 2) : méthodologie de diagnostic de l'érosion interne dans les digues en remblai

ERINOH Guidelines (volume 2): internal erosion diagnosis methodology applied to embankment dikes

D. François¹, P. Mériaux², J. Monnet³

¹ EDF R&D, Chatou, daniel.francois@edf.fr

² Irstea, Unité Ouvrages hydrauliques, Aix en Provence, patrice.meriaux@irstea.fr

³ L3SR, Grenoble, jacques.monnet@ujf-grenoble.fr

Résumé

Le thème *Recommandations* du Projet National ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques) avait pour objectif de produire trois guides permettant de capitaliser les connaissances acquises pendant ces recherches. Le présent guide propose des recommandations sur l'emploi des méthodes de reconnaissance et de surveillance des digues et suggère une méthodologie de diagnostic de l'érosion interne pour ces ouvrages à long linéaire. Le guide est composé de trois parties.

La première partie, corps de texte principal de ce guide, est structurée en cinq chapitres.

Le chapitre 1 introduit le guide. Il cerne le contexte et les enjeux de la maintenance des ouvrages hydrauliques en remblai, notamment des digues, rappelle les exigences de la réglementation de 2007 et précise le contour et les objectifs du guide ainsi que le public visé.

Le chapitre 2 propose une description succincte des ouvrages hydrauliques en remblai préférentiellement visés par le guide. Les lois d'érosion interne sont aussi rappelées dans ce chapitre.

Le chapitre 3 aborde une description des propriétés des matériaux constituant les digues et leur fondation et rappelle succinctement les procédés de classification des sols. Les relations entre les propriétés physiques des sols et les grandeurs géophysiques mesurées sont aussi données dans ce chapitre.

Le chapitre 4 propose un inventaire des méthodes de reconnaissance et de surveillance capables de détecter les anomalies dues aux fuites et précise les avantages, inconvénients et les limites d'emploi. Dans ce chapitre, nous illustrons quelques nouveaux développements qui vont permettre d'améliorer la robustesse des méthodes de détection.

Le chapitre 5 développe une méthodologie de reconnaissance et de diagnostic des digues vis-à-vis du risque d'érosion interne. Des critères d'érosion sont exploités pour mener au

diagnostic.

La seconde partie du guide rassemble des fiches techniques descriptives des méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique.

La troisième partie résume, sous la forme de fiches synthétiques, les essais sur sites réalisés pendant le programme ANR ERINOH.

La présente communication propose un résumé de la première partie de ce guide, en insistant sur les méthodes d'investigation et sur les avancées méthodologiques apportées par les travaux de recherche dont il est le produit.

Abstract

The aim of *Recommendations* theme of ERINOH's French project was to provide three guidelines which gather and capitalize the knowledge gained during these studies. This guide suggests recommendations on reconnaissance and surveillance methods used on dikes and proposes a diagnosis methodology to detect internal erosion on long linear structures. The guide is composed of three parts.

The first part is the main text and contains five chapters.

Chapter 1 defines the context and stakes of maintenance of earthen dikes, reminds the French 2007 safety regulation demand, clarifies the perimeter and the objectives of the guide and indicates the public preferentially concerned by the guide.

Chapter 2 suggests a short description of hydraulic structures (earthen dikes and embankments) preferentially concerned by this guide, e.g. levees and dikes. Internal erosion laws are also reminded in this chapter.

Chapter 3 gives a description of material's properties of dikes and their foundation and quickly reminds soil's classifications methods. Relationships between physical properties of materials and geophysical measurements are also given in this chapter.

Chapter 4 provides an inventory of surveillance and reconnaissance methods able to detect anomalies related to leakage or seepage, gives their advantages, disadvantages

and limits. In this charter, we also present some new developments which will permit to improve robustness of methods or obtain some quantitative hydraulic data.

Chapter 5 defines and develops an efficient diagnosis methodology for assessment of the internal erosion risk on dikes. Some erosion criteria are used to lead to the diagnosis. The second part of the guide gathers technical sheets on geophysical and geotechnical methods commonly used on dikes.

The third part gathers technical sheets which synthesize on-site investigations realized during ERINOH's program.

This communication proposes a summary of the first part of the guide, emphasizing on investigation methods and on technologic advances provided by ERINOH' Projects.

Introduction

Contexte et enjeux

La France compte plus de 16000 km de digues tous types d'usages confondus (digues de protection contre les inondations, digues de voies navigables, d'aménagements hydroélectriques, digues maritimes, etc.). L'ensemble de ces ouvrages à grand linéaire, bien que majoritairement en remblai, sont, du point de vue de leur construction et de leur sollicitation, différents et ne relèvent pas tous de la même classification vis-à-vis du décret de décembre 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Contour du document, objectif et public visé

Ce guide a pour objectif de rassembler les connaissances acquises dans le cadre du projet ERINOH et de proposer une méthodologie allant jusqu'au diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai. Il constitue un état de l'art actuel dans ce domaine et s'appuie sur des travaux antérieurs (PN CRITERRE) et sur des contributions extérieures à ERINOH (EWG ICOLD). Les ouvrages préférentiellement visés par le guide sont les digues à charge transitoire et les digues à charge permanente. Par extension, certaines recommandations ou méthodologies formulées dans ce guide pourront être appliquées, avec discernement, à d'autres ouvrages hydrauliques en remblai.

Le mécanisme étudié dans ce guide est l'érosion interne et les méthodes mises en œuvre pour parvenir à la caractériser sont les examens visuels, les mesures d'auscultation (cas des digues à charge permanente), les méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique.

Le public visé par ce guide est le personnel technique relevant de la maîtrise d'ouvrage des digues chargé de la maintenance des ouvrages et les maîtres d'œuvre chargés de la mise en place d'un programme de reconnaissance ou de la conception d'un confortement.

Typologie des ouvrages hydrauliques en remblai, érosion interne et pathologies liées à l'érosion interne

Typologies d'ouvrages

La fonction première de tout ouvrage hydraulique - digue ou barrage - est de retenir de l'eau : pour la stocker (barrage), la canaliser (digue de canal) ou l'empêcher d'envahir une zone inondable (digue de protection contre les inondations). Il existe plus d'une dizaine de typologies ou conceptions d'ouvrages hydrauliques en remblai : digue homogène, digue zonée perméable, digue à noyau étanche, digue à masque, digue à parement protégé, digue confortée, etc. Pour les digues à charge permanente, les typologies ont été classées suivant la conception de leur zonage par Fell et al., [1].

Erosion interne

Les quatre principaux mécanismes d'érosion interne sont l'érosion de conduit, l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion. Les phases du processus d'érosion interne sont l'initiation, la continuation (absence de filtration), la progression et la formation d'une brèche. Foster et Fell [2] proposent quatre modèles de développement de rupture d'ouvrage par érosion interne suivant ce processus.

Pathologies liées à l'érosion interne

L'érosion interne est l'un des mécanismes de dégradation ou de vieillissement des ouvrages hydrauliques pouvant conduire à leur rupture plus ou moins soudaine. Nous identifions cinq principaux scénarios ou configurations favorables à l'amorçage d'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques :

- une géométrie inadaptée ou modifiée (soit par un phénomène naturel ou bien une action anthropique) ;
- la présence d'hétérogénéités perméables dans le remblai et / ou dans sa fondation ;
- des interfaces « sols – structures maçonnées » non ou mal maîtrisées ;
- des conditions hydrogéologiques particulières ;
- la présence de conduites sous pression détériorées.

Le retour d'expérience montre que ces scénarios entraînent des dégradations telles que l'apparition de fontis, des « sand-boils » (ou volcans de sable), la formation de conduits (par pourrissement de racines), l'apparition d'une fuite (due au creusement de terriers d'animaux fouisseurs) qui peuvent conduire à la formation d'une brèche inopinée dans la digue.

Propriétés des matériaux des corps de digues, fondations, hydrogéologie et érosion interne

Propriétés des matériaux

Le sol est un matériau poly-phasique constitué de grains, d'eau et d'air. Les caractéristiques physiques de base des matériaux constitutifs des corps de digue et leur fondation sont les masses volumiques des différents constituants du sol (grains, eau, air, volume unité de sol), l'indice des vides, la porosité, la teneur en eau et le degré de saturation. La connaissance de ces propriétés va permettre d'identifier et classer les sols, de paramétrer les modèles d'érosion et, dans certains cas, de localiser les zones d'érosion potentielle. La connaissance de la structure des sols est aussi un paramètre déterminant pour leur classification suivant la granulométrie, l'indice de plasticité, la teneur en argile. Pour les ouvrages en remblais, différentes classifications de sols ont été proposées. Nous avons retenu dans le guide deux classifications de sols en fonction de leur granulométrie : la classification GTR (Guides des Terrassements Routiers) pour les sols à gros grains (NF P11-300) et la classification américaine USCS (Unified Soil Classification System) pour les sols fins (ASTM D2487). Le graphique de Casagrande permet de classer les sols fins selon leur indice de plasticité [3].

L'eau dans le sol et les critères d'érosion

L'écoulement de l'eau dans le sol est fonction de la gravité, de la tension superficielle, de la pression osmotique due à la présence de sel dans le sol, du phénomène de succion (différence de pression entre la pression de l'air et la pression de l'eau interstitielle dans la zone non saturée). Dans le cas d'un écoulement libre dans un aquifère, on distingue une partie de l'aquifère saturé en eau (*zone saturée*) et une partie pour laquelle le taux de saturation est inférieur à 100%, c'est la *zone non saturée*, qui se situe au dessus de la zone saturée. La zone de transition entre la zone saturée et la zone non saturée est appelée *frange capillaire*. Dans la zone où l'eau est présente, une partie de l'eau reste liée à la surface des grains, c'est l'*eau adsorbée*. L'eau qui peut circuler librement entre les grains est dite *eau absorbée*.

Un certain nombre de travaux relatifs à la caractérisation et la classification des sols vis-à-vis de leur érodabilité ont été entrepris dans un passé récent. Parmi eux, citons ceux de Wan et Fell (2004) [4] puis Bonelli (2006) [5] qui ont fourni, aux travers d'expérimentations, des relations permettant d'interpréter les essais d'érosion de trou (Hole Erosion Test). Ces relations définissent un temps critique qui caractérise le passage de l'état d'initiation à celui de la progression de l'érosion interne. D'autres travaux, issus du Projet National ERINOH ont été récemment entrepris. Pour plus ample information sur l'état de l'art des essais d'érosion étudiés dans ce projet, le lecteur pourra se reporter au guide ERINOH « Méthodes d'essais et d'interprétation - normalisation ».

L'érosion des sols a aussi été étudiée selon deux autres critères : d'une part la granulométrie du sol et d'autre part le gradient hydraulique. Ces critères ont été validés par des essais de laboratoire, mais leur application sur site reste encore à démontrer. Du point de vue de la granulométrie, le critère de Kenney et Lau [6] semble le plus robuste alors que du point de vue du gradient hydraulique, le critère de Monnet [7] donne de bons résultats.

Relations entre propriétés des sols et mesures géophysiques

La géophysique a pour objet de déterminer les propriétés de la structure interne du milieu étudié – ici un ouvrage hydraulique – à partir de mesures d'une ou de plusieurs propriétés physiques de ce milieu. L'éventail des mesures possibles est limité par plusieurs conditions : i) la, ou les, propriété(s) physique(s) doit(ven)t présenter une variabilité suffisante en relation avec les paramètres ou les variables d'état recherchés, ii) les mesures doivent être rapides et légères pour pouvoir donner lieu à une réalisation sur le terrain qui soit techniquement et économiquement viable, iii) elles ne doivent pas modifier le milieu.

Pour la détection d'une anomalie pouvant provoquer de l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques, les propriétés qui répondent à cet ensemble de conditions sont peu nombreuses. Il s'agit des propriétés électriques (résistivité et permittivité diélectrique), de la vitesse de propagation des ondes de compression, de cisaillement et des ondes de surface, de propriétés thermiques et de la densité. Parmi ces propriétés, la porosité, la saturation en eau de l'espace poral et la granularité jouent un rôle très important. Dans cette partie, nous décrivons et illustrons, en nous appuyant principalement sur la littérature, quelques uns des matériaux constituant les sols en examinant la relation entre leurs propriétés physiques et les propriétés de détection des méthodes géophysiques. Ainsi, on peut définir des règles simples qui permettent d'établir une relation entre les anomalies affectant certaines propriétés du sol et une grandeur mesurable par méthodes géophysiques, par exemple : un vide, une cavité ou une augmentation de perméabilité (variation de la densité du sol) et la vitesse de propagation d'ondes sismiques.

Relations entre propriétés des sols et mesures géotechniques

Les reconnaissances géotechniques ont pour objet de déterminer la stratigraphie ainsi que les caractéristiques physiques, hydrauliques et mécaniques des sols constitutifs des digues ou de leur fondation à partir, soit d'essais sur échantillons au laboratoire de mécanique des sols, soit de mesures in-situ par des essais appropriés. Les mesures géotechniques permettent de décrire et de mesurer ou déterminer les paramètres d'identification du sol (porosité, indice des vides, densité, etc.), la perméabilité, les paramètres de déformabilité (indice de compression et de

gonflement, module pressiométrique, ..), les paramètres de résistance (cohésion et angle de frottement interne, pression limite pressiométrique, résistance de cône..) et les paramètres d'érosion.

Il est rare de disposer, sur un même site, de tous ces paramètres en un nombre suffisant de points pour que l'ensemble du massif de sol soit couvert. En effet, pour des raisons économiques, le nombre de sondages sur site est le plus souvent optimisé. On dispose alors que des valeurs de certains paramètres en certains points et d'autres paramètres en d'autres points. Usuellement, l'ingénieur géotechnicien tire alors le meilleur parti possible de ces informations éparées et son travail consiste à établir une coupe géotechnique représentative du site étudié. Le projet ERINOH a permis la mise au point des méthodes automatiques et précises de construction de profils géotechniques à partir de la méthode des clusters (Monnet et al [8]).

Méthodes de reconnaissance et de surveillance

Généralités

Les méthodes de surveillance regroupent les méthodes de surveillance programmée (réglementaire), les méthodes de surveillance renforcée (mises en place suite à la découverte d'une anomalie) et les méthodes de surveillance préventive (mises en place pour un ouvrage considéré à risque). Les méthodes de reconnaissance regroupent les méthodes télévisuelles déportées, les méthodes géophysiques et géotechniques. Elles sont le plus généralement déployées lorsqu'un gestionnaire souhaite obtenir un diagnostic approfondi de son ouvrage. Ces travaux peuvent requérir des compétences et matériels disponibles dans des structures externes au gestionnaire d'ouvrages (e.g. bureaux d'études). Ils s'inscrivent alors dans le cadre d'une consultation et nécessitent la rédaction d'un cahier des charges.

Il y a quelques différences dans les modes d'application et d'exploitation des méthodes de reconnaissance et de surveillance suivant le type d'ouvrage : digue en charge permanente ou temporaire. Cette problématique est abordée au chapitre traitant de la méthodologie de diagnostic de l'érosion interne.

Rôle des moyens d'investigation

Les méthodes de surveillance programmée comprennent les examens visuels et, essentiellement pour les digues à charge permanente, les mesures d'auscultation. Le rôle de l'examen visuel est de permettre le relevé des anomalies de toutes natures (dégradations, tassements, végétations localisées et inhabituelles, suintements, fuites, etc..) observées le long d'un ouvrage, en crête et en talus amont et aval. L'auscultation a pour objectif de suivre et analyser le comportement hydraulique et mécanique de l'ouvrage hydraulique. Le système d'auscultation est adapté à chaque ouvrage. Le suivi du comportement hydraulique de l'ouvrage est assuré par des piézomètres et des outils de jaugeage de débits de fuite

(capacités calibrées, déversoirs). Pour le suivi du comportement mécanique, l'auscultation comprendra des mesures de nivellement, de tassement, de déformation, et de déplacement.

Les méthodes de surveillance renforcée – mises en œuvre lors de la découverte d'une situation correspondant à un comportement anormal de l'ouvrage – sont les mêmes que celles précédemment citées mais pour lesquelles la périodicité est rapprochée. Certaines mesures de reconnaissance peuvent aussi être préconisées par les experts de l'ingénierie du maître d'ouvrage pour compléter l'analyse et le diagnostic.

La surveillance préventive sera mise en place en cas d'ouvrage identifié comme potentiellement à risque. Elle fait intervenir des méthodes et dispositifs de mesures automatisés et placés à demeure pour un suivi sur une longue période de temps. La fibre optique (thermométrie et déformation) fait partie des méthodes de surveillance préventive.

Les méthodes géophysiques permettent l'investigation du sol en sub-surface ou en profondeur de façon non intrusive, mais les grandeurs mesurées seront intégrantes et le plus souvent indirectes vis-à-vis de l'érosion interne. Dans la plupart des cas, l'emploi de plusieurs méthodes géophysiques – sensibles à des grandeurs distinctes – est nécessaire pour conforter un pré-diagnostic. Les méthodes géotechniques sont, quant à elles, localement destructives et fournissent des grandeurs caractéristiques (mécaniques, hydrauliques,..) locales. Ces méthodes géotechniques peuvent en outre permettre de vérifier très localement les données délivrées par les méthodes géophysiques. Par recoupement avec l'ensemble des données disponibles – dont celles de l'étude documentaire préalable – un diagnostic approfondi pourra être prononcé. Un classement des méthodes de géophysiques et géotechniques suivant leur mode d'application (reconnaissance ou surveillance) est proposé dans le guide.

Qualité, incertitude de mesure et fiabilité des résultats

Quelle que soit la mesure que l'on réalise, la question de la qualité de cette mesure peut se révéler essentielle car de cette qualité va dépendre l'exactitude des grandeurs calculées. Or, en métrologie, toute mesure est entachée d'une erreur et le calcul d'incertitude a pour objectif d'estimer cette erreur de mesure afin d'y attribuer un intervalle de confiance. Le panel des mesures caractéristiques des méthodes dénombrées précédemment est assez vaste et le niveau d'incertitude attendu n'est pas le même suivant qu'il s'agit des méthodes d'observation, d'auscultation ou de reconnaissance géophysique ou géotechnique. Par exemple, il existe des recommandations pour les mesures d'auscultation et des normes pour la mise en œuvre de certaines reconnaissances géophysiques et pour la plupart des reconnaissances géotechniques. Concernant les mesures de terrain, nous pouvons citer quatre principales sources d'incertitudes que l'opérateur doit maîtriser :

- la qualité métrologique de l'instrumentation ;

- la répétabilité et la reproductibilité des mesures sur site ;
- la représentativité de la mesure dans son contexte de terrain ;
- l'influence du facteur humain.

Pour limiter les sources d'incertitude, l'opérateur devra respecter les recommandations du constructeur des matériels de mesures et faire réaliser périodiquement les étalonnages ou calibrations. La répétabilité et la reproductibilité des mesures relèveront d'une part de l'existence de protocoles d'essai et d'autre part de l'expérience de l'opérateur. Le facteur humain est également maîtrisable grâce à l'application d'un protocole d'essai. Il est donc recommandé d'un établir un. Pour le calcul d'incertitude, il est rare de le voir appliquer lors de reconnaissances géophysiques, par exemple. Deux raisons principales à cela : le manque de données pour réaliser un « vrai » calcul d'incertitude selon la norme en vigueur (AFNOR NF ENV 13005) et l'absence de formalisation dans les cahiers des charges des donneurs d'ordre.

Du point de vue de la fiabilité des résultats, la problématique concerne essentiellement les méthodes géophysiques qui, pour certaines, font appel à des algorithmes d'inversion des données. Dans ce domaine, on est souvent en face d'un problème mal posé et sous déterminé, ce qui conduit à un manque d'unicité de la solution. L'interprétation des résultats est donc, dans certains cas, à mener avec précaution. Il faudra, autant que faire ce peut, s'appuyer sur la complémentarité des méthodes pour renforcer l'interprétation (voir le § « Complémentarité des méthodes »), notamment par la réalisation de sondages géotechniques permettant de caler ou vérifier localement les mesures géophysiques.

Capacité et pertinence des moyens d'investigation

Les principes physiques sur lesquels reposent les méthodes de reconnaissance et de surveillance et le retour d'expérience acquis sur le déploiement et l'exploitation de ces méthodes sur sites – notamment lors du projet ANR ERINOH – permettent d'établir un classement de la sensibilité des méthodes vis-à-vis des principaux phénomènes à détecter. *In fine*, on précise dans le guide les limites d'emploi de ces méthodes en fonction de la nature de l'ouvrage, de la pathologie recherchée et de la présence éventuelle de biais liés à l'environnement. Cette analyse a conduit à constater qu'aucune des méthodes n'est capable, à elle seule, de diagnostiquer directement (détecter et quantifier) l'érosion interne.

Pour résumer, l'adéquation des méthodes de reconnaissance géophysique par type d'anomalies internes détectables (hétérogénéités, structures enfouies, fuites, érosion interne) est proposée dans le guide. Un exercice similaire est effectué pour les méthodes géotechniques. Le caractère intrusif de ces dernières les rend pertinentes pour caractériser directement une ou des propriétés du sol en place ou au laboratoire.

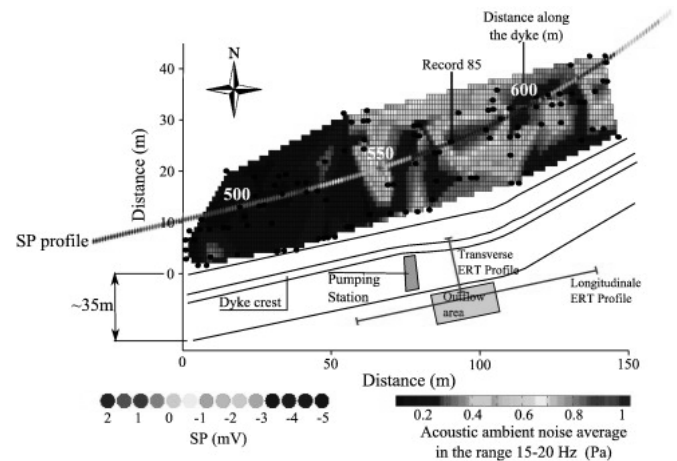


FIGURE 1: CARTOGRAPHIE PRESENTANT UNE ZONE MAJEURE DE BRUIT AUTOUR DE L'ENREGISTREMENT ACOUSTIQUE (RECORD 85) EN LIEN AVEC UNE ZONE D'ANOMALIE DE POTENTIEL SPONTANE (BOLEVE, 2012 [9])

Complémentarité des méthodes

Comme évoqué précédemment, l'emploi d'une seule méthode de reconnaissance ou de surveillance pour interpréter et diagnostiquer une anomalie se révèle en général insuffisant. Il faut donc s'appuyer sur davantage de données et croiser les méthodes qui, bien choisies, seront sensibles à des propriétés physiques ou paramètres d'état (température, état de saturation) différents et complémentaires. C'est d'ailleurs ce que l'on fait dans les différents programmes de surveillance notamment.

La surveillance programmée combine des examens visuels (donc de surface) avec des mesures d'auscultation (de surface et interne). Les outils mis en œuvre sont à la fois simples et qualitatifs pour les examens visuels et instrumentés et quantitatifs pour les mesures d'auscultation.

La surveillance renforcée combine les méthodes de surveillance programmée avec certaines méthodes de reconnaissance définies par l'expert du gestionnaire au moment du passage de la surveillance programmée à la surveillance renforcée. La surveillance préventive peut être réalisée à l'aide de fibres optiques de mesures réparties de température (fuite) et de déformation.

Quant aux programmes de reconnaissance pour le diagnostic, il est d'usage de déployer différentes méthodes telles que la tomographie de résistivité électrique (détection à grand rendement et détection localisée), le potentiel spontané (détection de zones d'infiltration), les mesures acoustiques (localisation de fuites en canal ou réservoir), etc. Comme on le voit, la décision de mise en œuvre de ces méthodes dépend grandement du type d'ouvrage. Elle se fait donc au cas par cas. La Figure 1 illustre un exemple de complémentarité des méthodes géophysiques (potentiel spontané et mesures acoustiques) mises en œuvre lors de la recherche de fuite dans un réservoir. La cartographie de bruit ambiant révèle, à l'endroit indiqué « Record 85 », une zone majeure de bruit où

une anomalie de potentiel spontané (SP) est localisée.

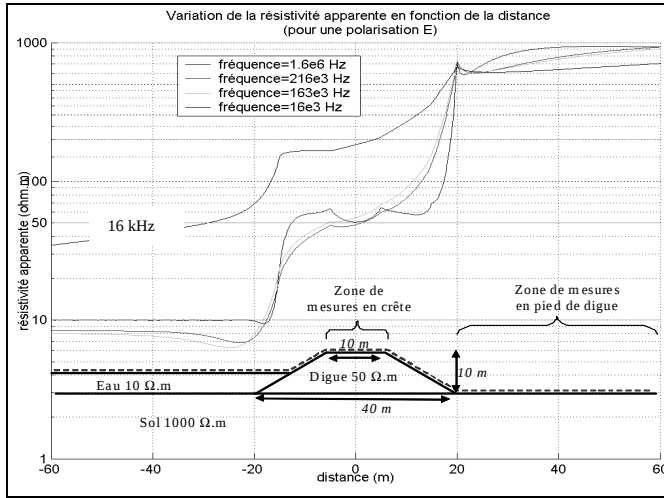


Figure 2: Illustration de l'effet de la topographie d'une digue sur les mesures ELECTROMAGNETIQUES BASSE FREQUENCE :
 PROJET ANR ERINOH (LRPC ROUEN)

Facteurs de biais et effets indésirables

Parmi les facteurs de biais pouvant affecter les reconnaissances géophysiques sur des ouvrages hydrauliques comme les digues en remblai, on peut citer : la topographie 3D des ouvrages, la présence d'éléments conducteurs dans les sols (e.g. palplanches, conduites métalliques...), les sources de bruits électriques, électromagnétiques (lignes électriques HT), acoustiques, mécaniques (vibrations), etc. L'importance de ces facteurs de biais peut, pour certains, être évaluée à l'aide de la modélisation numérique. La **Figure 2** montre que les changements de pente (topographie) induisent des anomalies sur la résistivité apparente. Dans le cas simple représenté par une digue de géométrie symétrique, une reconnaissance rectiligne (perpendiculaire au plan du graphe), en crête de digue et équidistante des bords de la digue permet – hors fréquence 16 kHz – d'éliminer cet effet topographique. Dans le cas présenté ici, la modélisation permet d'une part d'illustrer le facteur de biais (la topographie) et d'en tirer des conséquences sur le protocole expérimental à mettre en place pour les mesures de terrain et d'autre part d'éviter un choix de fréquence inapproprié.

Méthodes et dispositifs en cours de développement

Plusieurs études réalisées au cours et dans le cadre du projet ERINOH ont permis de développer et/ou améliorer des méthodes de reconnaissance.

En particulier, Bolève [10] propose un algorithme d'inversion 2D en potentiel spontané qui permet d'accéder à la vitesse de fuite au travers d'un remblai. La Figure 3 donne un résultat d'inversion 2D de données de terrain. La vitesse de fuite est estimée à partir de la densité de courant de convection fournie par le code d'inversion et d'une propriété physique du terrain

en place mesurée par un essai géotechnique.

Un essai au Perméafor réalisé lors des mesures de potentiel spontané montre une augmentation de la perméabilité de la digue à une profondeur (70-71 m) qui correspond à la forte densité du courant de convection. Cet essai de perméabilité permet donc de conforter le résultat fourni par le code d'inversion.

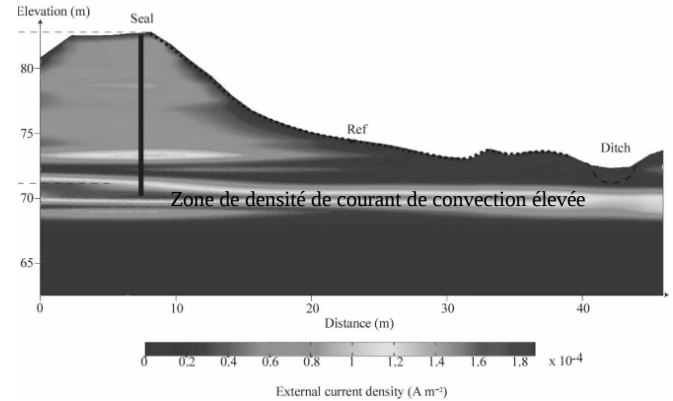


FIGURE 3: COUPE DE DENSITE DE COURANT DE CONVECTION
 OBTENUE POUR INVERSION 2D (BOLEVE, 2009)

Les travaux de Fargier [11] constituent un autre exemple d'amélioration significative en reconnaissance et imagerie électrique. Deux approches d'acquisition / inversion dites 2D⁺ et 3D⁻ ont été développées, améliorant la prise en compte de la topographie et de l'eau du réservoir d'une digue en eau. En particulier, l'approche 3D⁻ permet de tirer le meilleur compromis entre coût d'acquisition et fiabilité du modèle final. Cette approche est mise en place lorsque une anomalie est suspectée dans un ouvrage et/ou a été localisée lors d'une reconnaissance à grand rendement. Le principe consiste à placer deux lignes d'électrodes longitudinalement et transversalement sur la digue, les électrodes placées transversalement étant situées proches de l'anomalie suspectée (Figure 5). Cette approche a été déployée sur site. Une anomalie (en sombre), détectée au préalable par un moyen conventionnel (tomographie de résistivité électrique 2D transversale), est bien reconstruite (Figure 5).

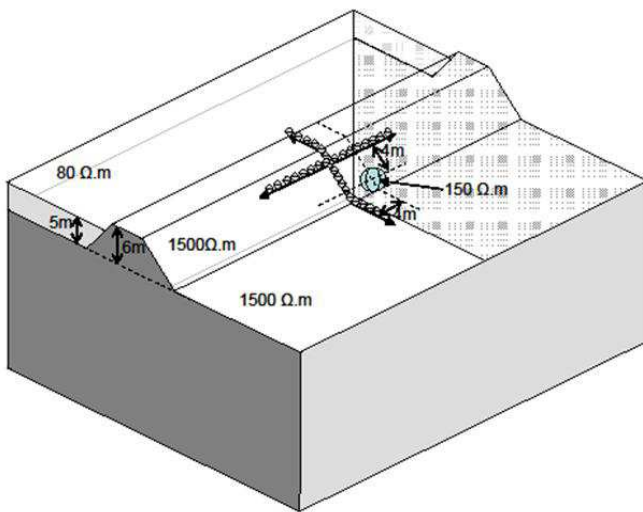


FIGURE 4: ILLUSTRATION DU PRINCIPE DE L'ACQUISITION 3D⁺.
(FARGIER, 2011)

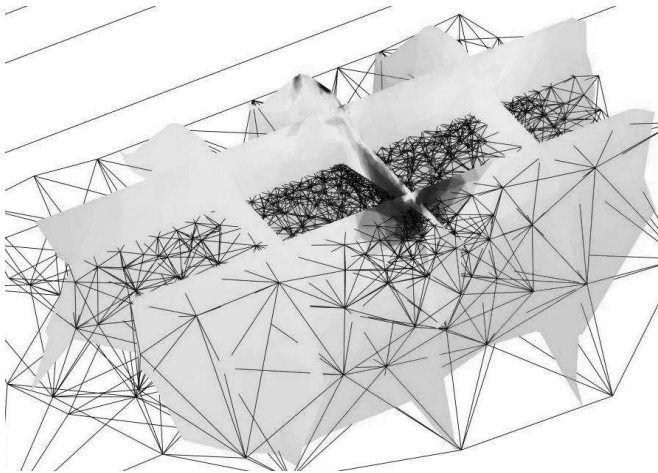


FIGURE 5: RESULTAT D'INVERSION 3D⁺ SUR DONNEES DE
TERRAIN (FARGIER, 2011)

Méthodologie de diagnostic de l'érosion interne

Généralités

La méthodologie de surveillance et de reconnaissance d'ouvrages hydraulique en remblai proposée suit un processus comprenant : l'enquête documentaire préalable, les surveillances programmée, renforcée et préventive, les reconnaissances pour le diagnostic, l'expertise et l'élaboration d'un diagnostic approfondi. Nous verrons dans la suite que cette méthodologie est à adapter en fonction du type d'ouvrage à investiguer.

Les apports du projet ERINOH

Différentes méthodologies de reconnaissance d'ouvrages hydrauliques en remblai existent déjà et sont mises en place ou commanditées par les gestionnaires d'ouvrage pour diagnostiquer l'état de leurs digues. L'objectif du guide

n'était donc pas de créer une nouvelle méthodologie mais plutôt de compléter l'existant en y intégrant les retombées des projets ANR et PN ERINOH. C'est ainsi que cette méthodologie met l'accent sur le diagnostic de l'érosion interne en associant les acquis du projet, tant en termes de méthodes de reconnaissance et de surveillance qu'en termes de lois d'érosion et de classification des sols sur critères d'érodabilité. La méthodologie se limite à la détection et au diagnostic de l'érosion interne d'une digue et n'aborde donc pas les critères de justification et de dimensionnement de l'ouvrage vis-à-vis de cet aléa. Pour ce dernier aspect, le lecteur pourra consulter le guide ERINOH « *Recommandations pour l'ingénierie* ».

Investigations et diagnostic de l'érosion interne

L'étude documentaire préalable consiste à rassembler les informations disponibles concernant l'ouvrage étudié. Elle rassemble notamment les plans, l'historique de la construction, les données hydrologiques et hydrogéologiques, l'historique des reconnaissances et les résultats de surveillance, des réparations, etc. Ce dossier permet de réaliser un premier découpage en zones de sensibilité à l'érosion interne de l'ouvrage à traiter.

La surveillance programmée est réglementaire. L'évaluation des anomalies est, le plus souvent, effectuée en termes de niveaux d'alarme à l'aide d'applications « propriétaires » e.g. VigiBarrages® [12].

Pour la surveillance renforcée, les outils d'investigations et le mode de diagnostic sont les mêmes que ceux de la surveillance programmée. La surveillance renforcée peut inclure des reconnaissances géophysiques et géotechniques dont la synthèse en vue du diagnostic sera établie par des experts nommés par le maître d'ouvrage après la fourniture et l'analyse des résultats faites par les opérateurs (sondeurs, géotechniciens, géophysiciens, ..).

Les outils mis en place pour la surveillance préventive (fibre optique) permettent aujourd'hui d'accéder à des grandeurs quantitatives et représentatives de l'érosion interne : la vitesse de fuite, la déformation. Une observation attentive de l'évolution de ces grandeurs va permettre, le cas échéant, d'alerter le gestionnaire d'une situation potentiellement à risque.

Pour l'établissement d'un diagnostic approfondi, un programme spécifique de reconnaissances géophysiques et géotechniques est à commanditer par le gestionnaire d'ouvrage. Le diagnostic sera établi ou, à tout le moins, validé par un groupe d'experts sélectionnés par le maître d'ouvrage en confrontant d'une part les résultats élaborés à partir des mesures de terrain (vitesse de fuite, perméabilité, granulométrie,...) avec les grandeurs mécaniques et hydrauliques calculées (vitesse critique, contrainte critique, gradient hydraulique critique,...) et d'autre part en exploitant les critères d'érosion (seuils) établis en laboratoire et visant à classer les sols vis-à-vis du risque d'érosion interne. Certains de ces travaux sont issus des projets ERINOH. Un exemple

de schéma décisionnel sur critères quantitatifs est proposé à la Figure 6. Ce schéma suggère l'action à entreprendre – allant de la simple poursuite de la surveillance programmée jusqu'à l'évacuation du site – selon la valeur quantitative des critères d'érosion comparée à leur valeur critique.

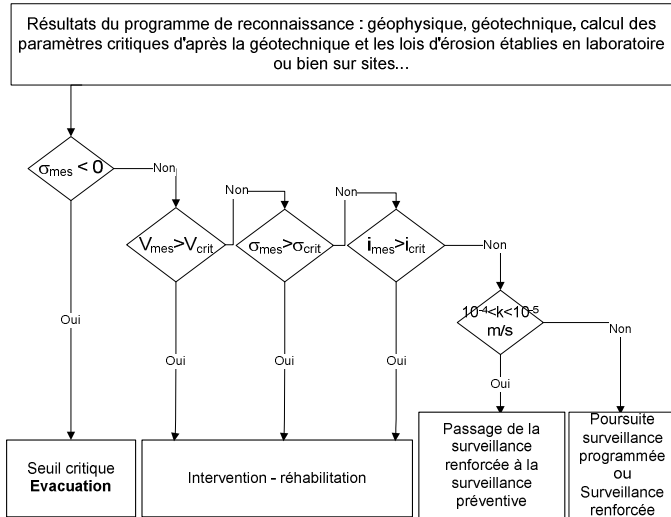


FIGURE 6: EXEMPLE DE SCHEMA DECISIONNEL SUR CRITERES QUANTITATIFS

Application particulière de la méthodologie pour les digues de protection contre les inondations

Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages destinés à ne retenir l'eau qu'en cas de crue d'un cours d'eau, c'est-à-dire en situation transitoire. Ces digues sont donc « à sec » en situation courante. Aussi, pour ce type d'ouvrages, la méthodologie doit être adaptée. Dans le processus décrit ci-avant, ce sont les surveillances programmées et renforcées qui méritent d'être redéfinies : les examens visuels sur digues en situation sèche ne sont naturellement pas pertinents pour la détection directe de fuite ou d'érosion interne. En revanche, ils restent efficaces pour déceler toutes singularités ou traces de dégradations pouvant favoriser l'érosion interne lors d'une crue à venir (e.g. un terrier traversant), voire résulter d'une érosion interne au cours d'une crue passée (e.g. fontis non rebouché).

En surveillance renforcée, le fait de rapprocher les visites en situations « sèches » ne permet pas de collecter plus d'indices de fuite ou d'érosion interne s'il n'y a pas eu de crue entre deux visites. Ce type de surveillance est en revanche précieux lors ou après un événement de crue ou un événement accidentel tel qu'un séisme.

Enfin, et puisque les crues (les sollicitations hydrauliques) sont plus ou moins rares pour les ouvrages du parc des digues fluviales, ces ouvrages sont peu équipés de dispositifs d'auscultation tels que définis pour les digues à charge permanente.

Pour toutes ces raisons, nous avons adapté la méthodologie

précédemment établie en y insérant des actions de surveillance ou de reconnaissances liées à la crue : surveillance visuelle en crue et post-crue, reconnaissances géophysiques à grand rendement en crue et post-crue. Pour plus amples informations concernant les reconnaissances géophysiques appliquées aux digues de protection contre les inondations, le lecteur pourra également se reporter au guide [13] et au livrable WP3-D3.2 du projet européen FloodProBE [14].

Conclusion

L'objet de la communication est de présenter à l'ensemble de la profession concernée par la surveillance et la sûreté des ouvrages hydrauliques en remblai (scientifiques, gestionnaires d'ouvrages, bureaux d'études, entreprises..) le livrable intitulé « *Méthodologie de diagnostic de l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques en remblai* » du thème « *Recommandations* » du Projet National ERINOH. Il est rappelé que les ouvrages concernés par ces recommandations sont préférentiellement les digues de canaux (à charge permanente) et les digues de protection contre les inondations (à charge transitoire). Le mécanisme étudié dans ce guide est l'érosion interne. Pour cela, il s'appuie sur les travaux d'un autre guide ERINOH « *Méthodes d'essais et d'interprétation - normalisation* ».

Ce guide a pour vocation d'être édité et s'adresse plus particulièrement aux personnels techniques relevant de la maîtrise d'ouvrage des digues chargés de la maintenance des ouvrages et les maîtres d'œuvre chargés de la mise en place d'un programme de reconnaissance ou de la conduite d'un diagnostic préalable à la conception d'un confortement.

Dans ce guide, nous décrivons brièvement les typologies des ouvrages étudiés (les digues) ainsi que les propriétés physiques des matériaux constituant les corps d'ouvrage et leur fondation. L'accent est mis sur les capacités et la pertinence des méthodes de reconnaissance et de surveillance à détecter les différentes hétérogénéités présentes dans les sols et notamment les zones perméables, les fuites qui sont des vecteurs initiateurs de l'érosion interne. Finalement, nous proposons une méthodologie de diagnostic de l'érosion interne qui intègre notamment de récents travaux réalisés dans le cadre des projets ERINOH.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR et l'IREX-RGCU, financeurs des projets ERINOH, les multiples opérateurs de terrain, tous les contributeurs au groupe de rédaction du guide – et leur organisme d'appartenance – ainsi que les nombreux gestionnaires d'ouvrages qui ont permis ou soutenu les travaux expérimentaux associés.

Références

- [1] Fell R., Wan C. F., Cyganiewicz J., Foster M., 2003, *Time for development of internal erosion and piping in embankment dams*, Journal of Geot. and Geoenviron. Eng., ASCE, april, 307-314.
- [2] Foster M., Fell R., 2001, *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*, Journal of Geot. and Geoenviron. Eng., ASCE, may, 398-407
- [3] Holtz R.D., Kovacs W.D., 1891 *An introduction to Geophysical Engineering*, Prentice-Hall
- [4] Wan C.F., Fell R., 2004, *Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations*, Univ. report N°R-429, Univ. of New South Wales, Sydney, Australia,
- [5] Bonelli S., Brivois O. et al., 2006, *On the modelling of piping erosion*, Comptes Rendus Mécanique, 334 (8-9), 555-559.
- [6] Kenney T.C., Lau D. , 1985, *Internal stability of granular filters*. Geotechnical Journal, Canadian. Vol. 22, pp. 215-225
- [7] Monnet A., 1998, *Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement*, Revue Française de géotechnique. Vol. 82 , pp.3-10.
- [8] Monnet J., Hughes J., Dafni J., 2012, *Cluster analysis and presuremeter survey – the Gray Harbor case*; ISC4 Conference, Porto de Galinhas, 2012, 911-919
- [9] Bolève, A., Vandemeulebrouck, J., Grangeon, J. *Dyke leakage localization and hydraulic permeability estimation through self-potential and hydro-acoustic measurements : self-potential "abacus" diagram for hydraulic permeability estimation and uncertainty computation*. Journal of Applied Geophysics 86 (2012), 17-28)
- [10] Bolève, A. 2009, *Localisation et quantification de zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*, Fugro - Mémoire de thèse mars 2009
- [11] Fargier, Y. 2011, *Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*, 2011. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes. EDF/IFSTTAR/LRPC Rouen.
- [12] Vigie Barrages®, *Visite d'Inspection Garantissant l'Intégrité des barrages en Exploitation - Logiciel réservé à l'exploitant comme support pédagogique pour les examens visuels et les outils d'auscultation* – Cemagref / EDF
- [13] Fauchard, C., Mériaux, P. (2007), *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes: Guide for implementation and interpretation*, Editions Quae, June 2007
- [14] Royet, P. et al., Work-Package 3; Deliverable 3.2 : « *Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing* » du Projet européen FloodProBE (2009-2012)

Mots-Clés

Erosion interne, digues, détection, méthodologie, diagnostic