

Les méthodes de reconnaissance à grand rendement adaptées aux digues de protection contre les inondations

High output geophysical methods for the diagnosis of dikes

Cyrille FAUCHARD

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen

Chemin de la Poudrière - BP 245

76121 Grand-Quevilly CEDEX

Tel. 02.35.68.92.95

Fax 02.35.68.81.88

E.mail : cyrille.fauchard@equipement.gouv.fr

Patrice MÉRIAUX

Cemagref, Unité de Recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie »

Le Tholonet BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1

Tel. 04 42 66 99 51

Fax 04 42 66 88 65

E.mail : patrice.meriaux@cemagref.fr

Résumé

Cette communication présente une synthèse des principaux résultats obtenus à l'issue d'un programme de recherche de 4 années mené dans le cadre du Projet National CRITERRE et qui a porté sur les méthodes de reconnaissances géophysiques et géotechniques à grand rendement utilisables dans le contexte des digues de protection contre les inondations - ouvrages hydrauliques de grande longueur et "à sec" la plus grande partie du temps, ce qui en complique le diagnostic.

Ces résultats s'appuient en particulier sur des campagnes de mesures expérimentales réalisées dans plusieurs contextes d'endiguements. Une méthodologie de mise en œuvre est proposée et les méthodes géophysiques employées sont présentées.

Abstract

This communication outlines the results of 4 years of research (French National Project CRITERRE) dealing with geophysical and geotechnical high output methods used for the diagnosis of flood protection dikes. The diagnosis of these embankments structures is difficult because they are very long and are not saturated under the service conditions. These results have been obtained from experimental measurement conducted in various contexts. A practical methodology is proposed and the suggested geophysical methods are presented.

Mots-clés : diagnostic, digues de protection contre les inondations, reconnaissance géophysique, méthodes électromagnétiques, méthodes électriques

Keywords: *diagnosis, flood protection dikes, prospecting geophysics, electromagnetic methods, electric methods*

Introduction

Les digues (ou levées) de protection contre les crues, qui bordent de nombreux cours d'eau français, ont subi de multiples modifications au cours de leur cycle de vie : il s'agit d'ouvrages parfois très anciens, en terre pour la plupart, construits par étape et dont la structure - en général méconnue - comporte des hétérogénéités tant dans le sens transversal (ex : présence d'une recharge intégrée à l'un des talus) que longitudinal (existence d'une réparation de brèche historique).

Les crues spectaculaires et parfois dramatiques de la dernière décennie ont confirmé la fragilité chronique des digues et la nécessité de leur diagnostic. L'expérience – même récente - montre que les brèches formées dans les digues à l'occasion de telles crues sont souvent réparées à la hâte, à l'aide de matériaux d'apport peu contrôlés et, en tous cas, différents de ceux utilisés à l'époque de la construction, et que l'existence de ces réparations tend rapidement à se perdre dans les archives. Elles constituent, alors, des hétérogénéités masquées du corps de digue - sources potentielles de faiblesse de l'ouvrage - qu'il convient de détecter de façon sûre, puis de caractériser, lors d'un diagnostic ultérieur.

Dans ce contexte, les travaux de reconnaissance en vue du diagnostic des digues associent, de plus en plus souvent, l'utilisation de méthodes géophysiques à celle des méthodes géotechniques traditionnelles (forages, essais in situ, ...). Par rapport à ces dernières, les méthodes géophysiques apportent, en général, l'avantage d'un pas de mesure très fin (ne nuisant pas ou peu au rendement) mais, a contrario, ne fournissent que des valeurs « apparentes » d'une caractéristique du sol.

D'une façon générale, enfin, les digues présentent des difficultés particulières vis-à-vis de l'utilisation des méthodes géophysiques ou géotechniques :

- elles sont « à sec » (sans charge hydraulique) la majeure partie du temps et l'élément essentiel de leur vulnérabilité en crue, à savoir l'eau susceptible d'y circuler, est absente lors des reconnaissances. En outre, l'absence d'eau atténue a priori les contrastes de résistivité des sols auxquels de nombreuses méthodes géophysiques sont sensibles ;
- leur grande longueur pose, en termes particulièrement accentués, le problème de l'optimisation technico-économique des reconnaissances.

Tout ceci justifie les recherches expérimentales qui ont été menées de 1998 à 2004 par le LCPC de Nantes et le Cemagref Aix-en-Provence, au titre du Projet National de Recherches "CRITERRE", piloté par l'IREX. Ces recherches visaient à tester et évaluer, sur deux configurations d'endiguement (l'une sur la rivière du Cher en Indre-et-Loire et l'autre sur le fleuve côtier Agly dans les Pyrénées Orientales), des méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique à grand rendement applicables aux digues et à dégager de ces campagnes expérimentales des éléments méthodologiques pour une utilisation optimale de tels outils.

Ces recherches vont aboutir à la publication très prochaine d'un guide technique de recommandations à destination des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrages, permettant de hiérarchiser les diverses méthodes géophysiques et géotechniques en fonction de leur aptitude à répondre à la problématique du diagnostic à grand rendement pour les digues à sec.

S'appuyant sur les éléments de ce futur guide, le présent article expose brièvement la méthodologie recommandée pour la mise en œuvre d'un programme de reconnaissances utilisant la géophysique, puis décrit les différentes méthodes géophysiques mises en avant à l'issue des travaux de recherches expérimentales pour contribuer efficacement au diagnostic des digues.

1. Méthodologie de mise en œuvre d'un programme de reconnaissance utilisant la géophysique

1.1 Place du volet d'études géotechniques dans la démarche d'ensemble du diagnostic et méthodologie générale de mise en œuvre

La méthodologie optimale de *diagnostic des digues* est pluridisciplinaire (Lino § al., 2000) et associe notamment des volets d'étude historique, topographique, géomorphodynamique et hydraulique au volet des études relevant de la géotechnique au sens large (Lino, Royet, 2004).

Le **volet géotechnique du diagnostic des digues** comprend lui-même trois phases. La première est la phase d'études préalables au diagnostic, **la recherche d'indices**, nécessaire à la bonne mise en œuvre de la deuxième phase, **la reconnaissance géophysique**, puis de la troisième phase, **la reconnaissance géotechnique**. La méthodologie générale est présentée sur la Figure 1 ci-après.

1.2 Etape préalable au déploiement des méthodes géophysiques

La recherche d'indices avant le déploiement des méthodes géophysiques constitue une étape préalable absolument indispensable.

Elle consiste à recueillir - par une recherche et analyse d'archives, des entretiens avec le gestionnaire et une inspection visuelle des ouvrages - le plus d'informations possibles concernant l'histoire de la digue (construction, anciennes brèches), ses caractéristiques extérieures (topographie, état d'entretien et désordres) et le système dans lequel elle s'intègre (géologie locale et dynamique du cours d'eau). Cette étude doit permettre de renseigner sur la nature des matériaux constituant la digue, sur la nature du terrain sur lequel elle repose et sur les conditions hydrauliques et morphodynamiques auxquelles elle est ou susceptible d'être soumise. La qualité du diagnostic tient tout d'abord au respect de cette phase de l'étude.

Méthodologie générale pour le diagnostic des digues « à sec »

I – Recherche d'indices

- 1 - Recherche historique
- 4 - Inspection visuelle
- 2 - Étude géologique
- 5 - Analyse morphodynamique du cours d'eau
- 3 - Topographie

II – Reconnaissance géophysique à grand rendement

1 – **Méthodes privilégiées** pour une reconnaissance à grand rendement et à profondeur de pénétration optimale

Méthodes électromagnétiques: Slingram ou RMT
Résultat : premier zonage de la digue

en option

2 – **Méthodes complémentaires** pour une(des) reconnaissance(s) locale(s) à profondeur de pénétration optimale

Méthode : Panneau électrique
Résultat : un zonage ponctuel (ex : détail sur une coupe en travers)

Méthode : Sismique réflexion
Résultat : interface digue/fondation

III – Reconnaissance géotechnique

Sondages pénétrométriques (statique, dynamique classique ou dynamique léger)	Sondages destructifs avec enregistrement de paramètres Fosses à la pelle mécanique
Sondages carottés jusqu'à la fondation) équipés d'un piézomètre -prélèvement d'échantillons -essais de perméabilité Lefranc	

IV – Diagnostic

Figure 1 : Méthodologie générale pour le diagnostic des digues à sec. Sur fond gris, méthodes géophysiques déployées.

1.3 Objectifs et critères de choix des méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques utilisées pour le diagnostic des digues doivent répondre au moins aux deux impératifs suivants :

- ausculter de grands linéaires ;
- rendre compte du degré d'hétérogénéité de l'ouvrage sur toute sa hauteur (y compris sa fondation).

Les méthodes prioritairement déployées doivent donc être des méthodes à grand rendement et à profondeur de pénétration optimale.

Par ailleurs, la plupart des digues sont des ouvrages en remblai constitués d'une succession de couches de matériaux limoneux, sableux, voire localement graveleux. Aussi, d'un point de vue électromagnétique, le corps de l'ouvrage est-il majoritairement conducteur, c'est-à-dire que la nature de ses constituants est telle qu'un courant électrique continu ou basse fréquence peut aisément y circuler ou respectivement s'y diffuser. En géophysique, on parle généralement de la grandeur inverse : la résistivité. La mesure de cette grandeur permet ainsi de déterminer des zones plus ou moins conductrices (inversement plus ou moins résistantes), c'est-à-dire dans le cas des digues et/ou de leur fondation, des zones plus ou moins limoneuses ou argileuses¹.

Les méthodes géophysiques à grand rendement dont la profondeur de pénétration permet une investigation sur une hauteur d'une dizaine de mètres, dans des matériaux plutôt conducteurs, sont des *méthodes électromagnétiques basse fréquence*.

Deux types de méthodes ont ainsi largement été déployés pour le diagnostic à grand rendement des digues à sec :

- les méthodes en champ proche (type EM), qui permettent de mesurer la conductivité électrique apparente (S/m) des matériaux de l'ouvrage ;
- les méthodes en champ lointain (type RMT), qui permettent, dans les expérimentations menées sur les digues, de mesurer la résistivité apparente ($\Omega.m$), grandeur inverse de la conductivité.

L'objectif principal des méthodes géophysiques est de réaliser un zonage d'hétérogénéité de la digue et de déterminer les tronçons de l'ouvrage dont les caractéristiques physiques diffèrent et où la situation en crue pourrait engendrer des dommages irréversibles (brèches, en particulier).

¹ et de fait, plus ou moins étanches (étant rappelé que la perméabilité d'un ouvrage hydraulique est un élément fondamental de son diagnostic).

Ce zonage doit être ensuite contrôlé par des reconnaissances géotechniques² (sondages au pénétromètre statique, dynamique classique ou dynamique léger, sondages carottés, sondages destructifs, essais de perméabilité, autres essais in situ, ...). Les informations recueillies lors de la phase de reconnaissance géotechnique permettent alors de corréliser les caractéristiques mécaniques ou de perméabilité avec les grandeurs physiques mesurées à l'aide des méthodes géophysiques sur l'ensemble de l'ouvrage.

2. Méthodes géophysiques à grand rendement

2.1 Méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche : méthodes Slingram (type EM)

Les méthodes basse fréquence en champ proche, ou méthode Slingram, utilisent comme émetteur et récepteur des dipôles magnétiques (boucles de courant) verticaux ou horizontaux par rapport au sol. La source génère un champ magnétique primaire H_p à une fréquence donnée f via une bobine d'induction reliée à une source oscillante (Mc Neil, 1980a; 1980b). Lorsque le champ primaire rencontre une anomalie conductrice, le champ secondaire H_s , beaucoup plus faible, est créé.

La grandeur mesurée est le rapport de la composante du champ secondaire en quadrature au champ primaire. Elle permet de décrire les hétérogénéités conductrices du sous-sol en terme de conductivité apparente (inverse de la résistivité apparente). Dans le cas de la figure 2, en mode H, la conductivité apparente du sol est donnée par :

$$\sigma_a = \frac{|H_s|}{|H_p|} \frac{2}{\pi f \mu_0 s^2} = \frac{I}{\rho_a} \text{ (S/m)}$$

avec $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$, la perméabilité magnétique du vide.

La profondeur d'investigation dépend de la distance « s » entre bobines et du mode de mesure : lorsque les deux bobines sont horizontales (ou mode H) par rapport au sol, la profondeur d'investigation est de l'ordre de $s/2$. Lorsqu'elles sont verticales (ou mode V) par rapport au sol, la profondeur d'investigation est de l'ordre de $3s/2$.

Le résultat des mesures est un profil de résistivité apparente (moins souvent de conductivité apparente) en fonction de la distance parcourue en crête de digue. Généralement, on réalise les mesures côté val et côté fleuve selon les deux modes V et H, soit au total 4 profils.

² cf. phase III de la méthodologie générale décrite sur la Figure 1.

Le dispositif de mesure le plus utilisé en géophysique appliquée est l'EM 31 de la société Geonics. Deux bobines parallèles aux extrémités d'une perche de 3,7 m, portable par un seul opérateur, fonctionnant à la fréquence 9,7 kHz permettent d'ausculter des profondeurs d'environ 2 m en mode H et 6 m en mode V. D'autres dispositifs existants peuvent atteindre une profondeur théorique de 50 m, mais ils n'ont pas été testés en grand rendement.

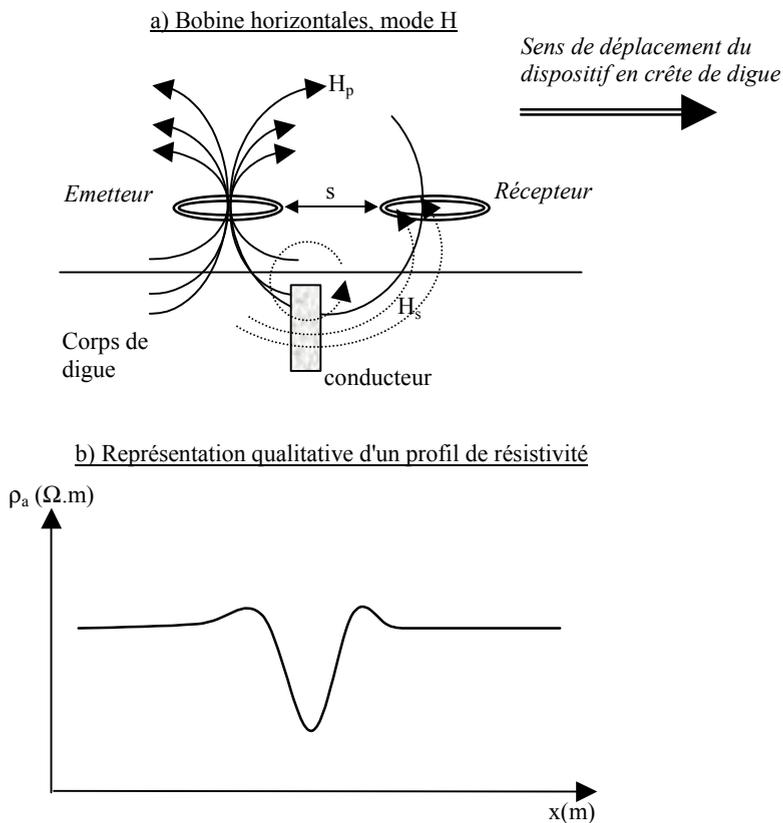


Figure 2 : a) Principe des méthodes Slingram et b) représentation qualitative d'un profil de résistivité apparente obtenu au-dessus d'une anomalie conductrice.

L'appareil EM 31 - généralement utilisé en mode pédestre en mesure point par point (espacement usuel des points : 5 m) - a été testé sur les digues de l'Agly avec un point de mesure toutes les secondes (cf. Figure 4), au cours d'une expérimentation toute récente (mai 2004) conduite par le LCPC de Nantes et le Cemagref dans le cadre de l'ultime phase du projet CRITERRE. A cette fin, il a été tracté derrière un véhicule roulant à vitesse constante d'environ 5 km/h en crête de digue, selon deux profils : un côté val et un côté fleuve. Le pas de mesure est d'environ 1,4 m.

L'interprétation des mesures est essentiellement qualitative. Elle permet de localiser des zones plus ou moins conductrices, reflétant la nature et la répartition longitudinale des matériaux dans le corps de digue. On notera qu'à contraste de résistivité équivalent avec l'encaissant, une hétérogénéité conductrice donnera une variation plus forte qu'une hétérogénéité résistante. La méthode est donc mieux indiquée pour révéler les zones ou les anomalies argileuses³ du corps de digue.

La partie haute de la figure 4 (cf. 2.2 ci-après) montre la localisation d'une ancienne brèche (entre les points métriques du profil en long de crête de digue : 400 à 600 m) consécutive à la crue de l'Agly de novembre 1999, comblée lors de sa réparation de matériaux plus résistants.

Les mesures en mode H, relatives aux couches supérieures, donnent des valeurs globalement plus résistantes que les mesures en mode V, relatives aux couches plus profondes. Ceci reflète bien la constitution générale de la digue qui comprend une couche supérieure résistante, la chaussée (matériaux bitumineux et graveleux), et des couches profondes plus conductrices (corps de digue et fondation superficielle) contenant des limons.

Ces mesures sont, en outre, exploitées pour implanter judicieusement les sondages géotechniques dont les résultats (nature des matériaux, caractéristiques mécaniques...) permettront d'établir les corrélations avec les mesures géophysiques (répartition et nature plus ou moins résistante des matériaux de la digue).

Enfin, la méthode est rapide à mettre en œuvre et la répétitivité des mesures apparaît de bonne qualité. On peut, cependant, recommander de vérifier cette répétitivité, au moment du démarrage de chaque opération, en faisant doubler un profil de mesures sur au moins un tronçon d'essais de 100 ou 200 m : ceci permet très simplement de s'assurer du caractère opérationnel du matériel utilisé et du bon niveau de pratique des opérateurs.

2.2 Méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain : méthode radio magnéto tellurique (RMT)

La radio magnéto tellurique (RMT) est un cas particulier des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain.

Le principe repose sur l'émission d'un champ électromagnétique primaire par un émetteur radio (militaire ou civil, de 10 kHz à 1Mhz environ) et sur la diffusion de ce champ dans le terrain. La présence d'hétérogénéités dans le sol crée un champ secondaire dont on mesure les effets en surface.

Au point de mesure, le champ électrique primaire est parallèle au sol (Figure 3), dans la direction de l'émetteur. Le champ magnétique primaire est orthogonal au champ électrique et parallèle à la surface. Le champ électromagnétique décroît exponentiellement avec la profondeur.

³ Comme, par exemple, une conduite métallique traversant le corps de digue.

Les grandeurs mesurées en surface sont le champ électrique total et le champ magnétique total, résultant des champs primaire et secondaire. Le rapport des champs électrique et magnétique mesurés donne accès à la résistivité apparente, obtenue par la formule de Cagniard (Cagniard, 1956):

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} (\Omega.m)$$

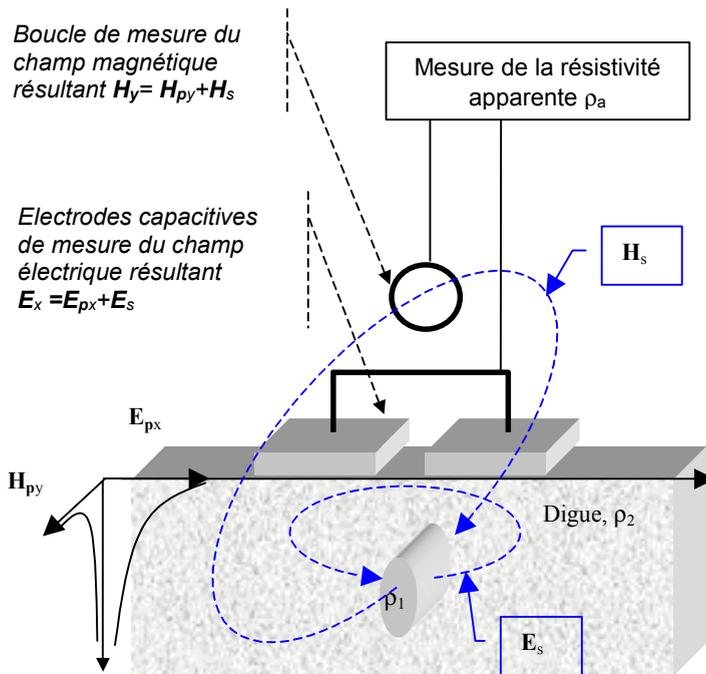


Figure 3 : Principe de mesure de la résistivité apparente en radio magnéto tellurique

La profondeur de pénétration des ondes dans un sol homogène de résistivité ρ est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)}$$

où f est la fréquence de l'émetteur radio utilisé comme champ source.

La profondeur d'investigation est généralement comprise entre le tiers et la moitié de la profondeur de pénétration. A la fréquence de 163 kHz (France Inter grandes

ondes), la profondeur d'investigation pour un sol de résistivité comprise entre 10 et 1000 $\Omega.m$ est donnée dans le tableau suivant :

Fréquence = 163 kHz

Résistivité apparente ($\Omega. m$)	1000	100	10
Profondeur de pénétration (m)	39,3	12,4	3,9
Profondeur d'investigation approximative (m)	19	6	2

Le dispositif de mesure (Hollier-Larousse A., 2000) est constitué d'une boucle de courant pour la mesure du champ magnétique, et de deux électrodes capacitatives en contact avec le sol pour la mesure du champ électrique. Les mesures sont réalisées point par point et déclenchées par une roue codeuse, dont le pas de mesure peut être de 0,5 m. L'ensemble est tracté derrière un véhicule à une vitesse comprise entre 5 et 10 km/h et permet, donc, des mesures à grand rendement.

L'interprétation des mesures est qualitative. La méthode est plus sensible aux hétérogénéités résistantes que la méthode Slingram. Les fortes variations de résistivité indiquent un changement local et proche de la surface des propriétés du matériau, tandis que les variations lentes sont synonymes d'un changement plus en profondeur des propriétés des matériaux (Lagabrielle R, 1986).

Deux exemples de mesure réalisés à 163 kHz, au pas de 0,5 m sur la même portion de digue que celle présentée précédemment (digue de l'Agly) sont donnés sur la Figure 4. Il concerne la même profondeur d'investigation contrairement aux mesures Slingram. Ces deux profils (p2 et p4), réalisés au printemps 2004 sur la zone de brèche (Fauchard et al., 2004), permettent d'apprécier la répétitivité des mesures. A ce titre, ces essais de répétitivité ont montré qu'il était nécessaire d'effectuer au moins trois profils successifs pour pouvoir interpréter convenablement une mesure RMT, ce qui bien sûr pénalise le rendement de la méthode. Cette variabilité constatée est inhérente au matériel utilisé et au mode de mesure.

D'autres méthodes peuvent être envisagées et devront être testées : notamment les méthodes basse fréquence en mode inclinaison.

Les digues de l'Agly ont fait l'objet en 2000 de nombreuses mesures RMT (Hollier-Larousse A., 2001) et d'une analyse complète corrélée avec l'historique et l'inspection visuelle de la digue ((Mériaux P. et al., 2003). On retrouve l'ancienne zone de brèche localisée par la méthode Slingram sur les deux profils. D'autres pics de résistivité se retrouvent sur les deux types de mesure Slingram et RMT. Cependant, les mesures RMT révèlent d'autres hétérogénéités résistantes (dont certaines ont pu être interprétées comme des structures en enrochements incorporées dans le corps de digue) auxquelles la méthode Slingram est moins sensible. Les deux méthodes apparaissent, donc, complémentaires.

Enfin, il faut accorder, tant pour la méthode Slingram que pour la méthode RMT, une valeur relative aux mesures de résistivité apparente fournies, car les deux méthodes intègrent la mesure d'un volume de terrain hétérogène, de la surface vers la profondeur.

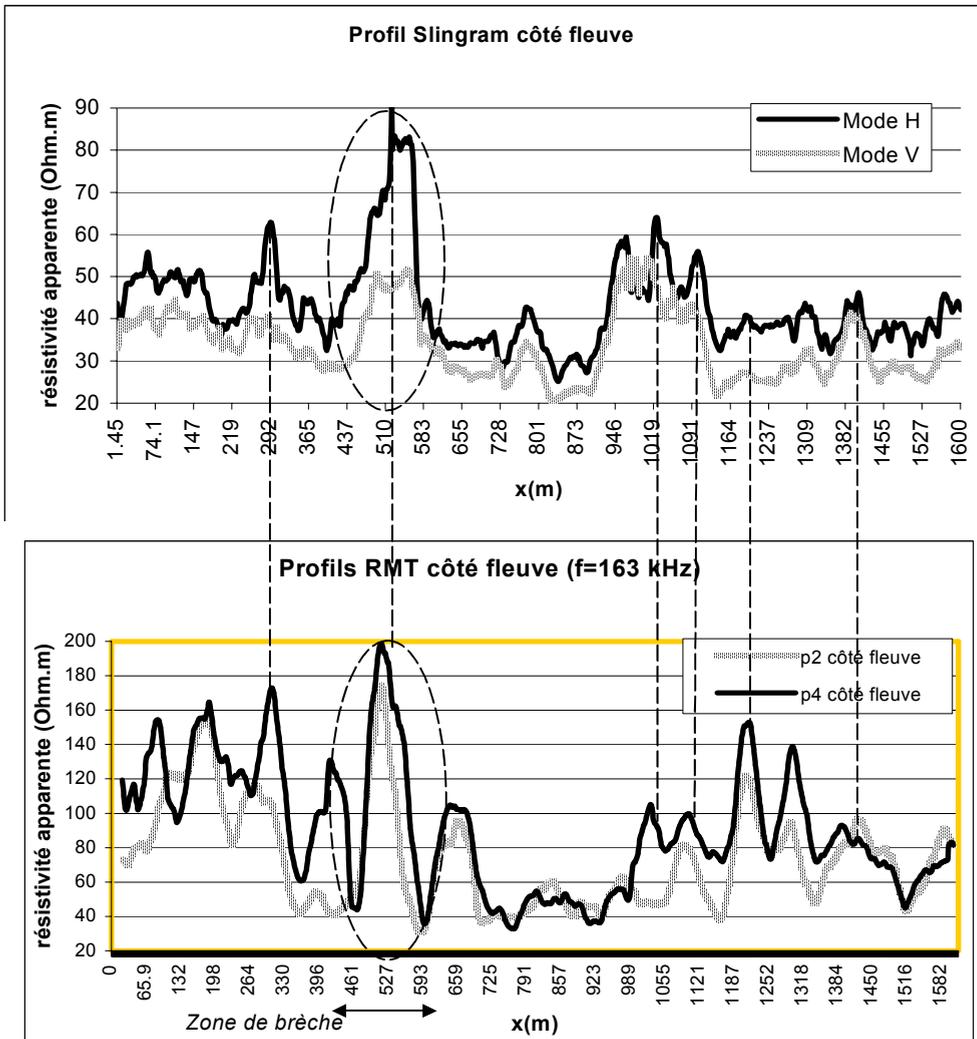


Figure 4 : Exemple de mesure Slingram et RMT grand rendement sur un linéaire de 1600 m de longueur sur la rive gauche de l'Agly, côté fleuve.

2.3 Autres méthodes à grand rendement

Le radar géologique, basé sur la propagation d'ondes électromagnétiques haute fréquence (10 MHz - 3 GHz environ), est parfois utilisé sur les digues comme

méthode à grand rendement. Cependant, ce type d'ondes ne pénètre pas, ou mal, les milieux plutôt conducteurs (dont la résistivité est inférieure à $100 \Omega.m$) comme cela est généralement le cas dans les corps de digue, si bien que la profondeur d'investigation dépasse rarement 2 m : ce qui est insuffisant pour contribuer efficacement au diagnostic. Dans le contexte des digues, l'usage du radar se limite donc à la caractérisation d'ouvrages particuliers : par exemple, repérage du contact entre une recharge aval drainante (peu conductrice et, donc, perméable aux ondes radar) et le talus originel d'un remblai de digue.

De même que le radar, le panneau électrique capacitif, basé sur l'injection d'un courant quasi continu, présente aussi une trop faible profondeur de pénétration.

3. Méthodes d'inspection locale à profondeur d'investigation optimale

Ce sont des méthodes complémentaires qui peuvent être déployées en deuxième étape de la reconnaissance géophysique (cf. Figure 1). Elles sont alors appliquées sur des secteurs choisis en fonction du premier zonage issu des méthodes à grand rendement. Ces méthodes locales sont utiles pour obtenir une image plus précise de tranches transversales ou longitudinales dans le cas, par exemple, de digues à structure complexe. Les résultats obtenus permettent alors d'obtenir un « calibrage » géophysique local, dont l'interprétation enrichit et complète celle des mesures à grand rendement.

a) Le **panneau électrique en courant continu**, basé sur l'injection d'un courant continu et la mesure du potentiel électrique à l'aide d'électrodes conductives (implantées dans le sol), est une méthode très efficace pour ausculter de manière locale, en complément des mesures grand rendement, des tranches longitudinales ou transversales du corps de digue.

Le résultat d'une mesure en panneau est une carte représentant la résistivité apparente (graduée en niveaux de couleur) en fonction de la position du centre du dispositif en abscisses, et de la longueur du dispositif en ordonnées. Des algorithmes d'inversion permettent d'interpréter les mesures en fonction d'une profondeur d'investigation plus ou moins grande, selon les hypothèses, la répartition des matériaux et la profondeur des hétérogénéités du sous-sol. Un exemple est donné sur la figure 5.

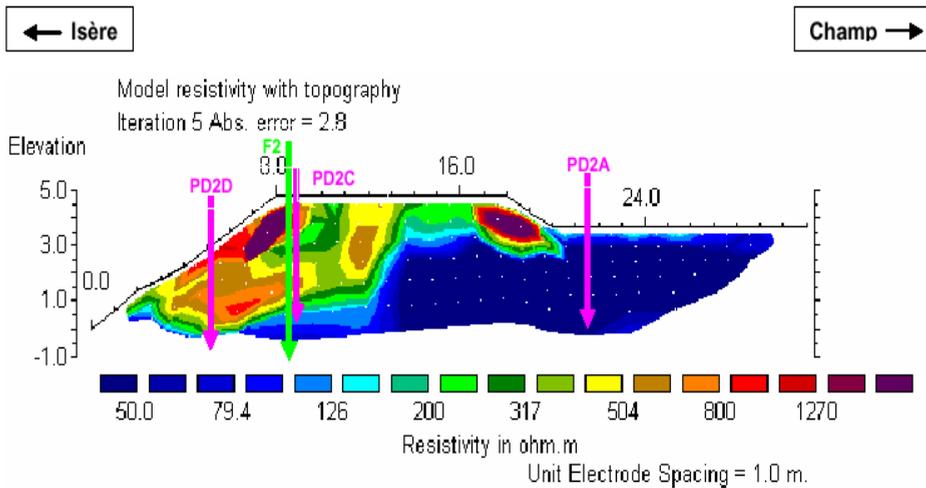


Figure 5 : Exemple de mesure en panneau électrique sur un profil transversal d'une digue de l'Isère (Document IMS)

b) La **sismique réfraction**, basée sur la propagation d'ondes mécaniques dans le sol est parfois utilisée pour détecter les interfaces entre couches, et plus particulièrement l'interface entre la fondation meuble de la digue et un substratum rocheux proche.

4. Conclusion

Le volet géotechnique du diagnostic des digues doit débiter impérativement par une recherche préalable d'indices (recherche historique, étude géologique, topographie, inspection visuelle, analyse morphodynamique). Les mesures géophysiques à grand rendement permettent ensuite d'apprécier le degré d'hétérogénéité de la digue, c'est-à-dire de déterminer les zones où la constitution de la digue varie et qui sont susceptibles d'évoluer défavorablement (brèche, infiltration...) lors d'une situation de crue.

Les méthodes géophysiques à grand rendement les plus adaptées pour le diagnostic des digues à sec sont les méthodes électromagnétiques basse fréquence. La méthode Slingram, sensible aux matériaux conducteurs du corps de digue est une méthode fiable et répétitive. La méthode radio magnéto tellurique est la méthode qui, historiquement, a été déployée la première pour des mesures à grand rendement. Elle présente cependant une grande sensibilité aux hétérogénéités de surface et au moins trois profils répétés sont nécessaires pour interpréter une mesure. Les deux méthodes sont complémentaires, la première étant plus sensible aux matériaux conducteurs que résistants, alors que la seconde est sensible aux deux types de matériaux. La reconnaissance à grand

rendement peut être complétée pour des zones particulières, de mesures en panneau électrique, dont les résultats permettent d'apprécier localement la répartition des matériaux. Pour chaque méthode, l'interprétation par un géophysicien expérimenté est nécessaire. Les méthodes géophysiques à grand rendement permettent, ensuite, d'implanter judicieusement les sondages géotechniques. L'interprétation définitive est menée en corrélant les données géophysiques et géotechniques.

Les travaux expérimentaux menés de 1998 à 2004 dans le cadre du Projet National CRITERRE vont aboutir à la publication très prochaine d'un guide de recommandations relatives à la mise en œuvre des méthodes géophysiques pour contribuer au diagnostic des digues. Les recherches sur ces méthodes devraient se poursuivre au titre du futur Projet National « Erosion interne » (Fry, 2004), en s'intéressant à leur mise en œuvre en conditions de crue ou d'après-crue. Elles se poursuivent aussi pour d'autres configurations, en particulier pour les digues en charge, où d'autres méthodes comme le traîné électrique aquatique de potentiels spontanés (Bièvre et al., 2004) permettent d'aider à localiser des fuites à travers le corps de l'ouvrage.

Remerciements

Les auteurs remercient le Réseau Génie Civil et Urbain qui a soutenu, au titre du Projet National CriTerre, les travaux de recherche objets du présent article et en a autorisé la publication.

Bibliographie

Lino M., Mériaux P., Royet P., 2000. *Méthodologie de diagnostic des digues, appliquée aux levées de la Loire moyenne*, Cemagref éditions, 224 p.

Royet P., Lino M., 2004. *Méthodologie de diagnostic pluridisciplinaire des digues fluviales*, colloque CFGB 2004

Mc Neill J.D., 1980a, *Electrical conductivity of soil and rocks*, Technical Notes TN-5, Geonics Limited,

Mc Neill J.D., 1980b, *Electrical terrain conductivity measurement at low induction numbers*, Technical Notes TN-6, Geonics Limited.

Cagniard L., 1953, *Principe de la magnéto-tellurique, nouvelle méthode de la prospection géophysique*, annales de géophysique, tome 9, fascicule 2.

Bièvre G., Norgeot C., à paraître 2004, *Utilisation de méthodes géophysiques pour l'auscultation des digues : études de cas sur le canal du Centre (France)*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées

Hollier-Larousse A., 2000 - *Reconnaissance géophysique par radio-magnétotellurique : PN CRITERRE*, thème anomalies physiques, reconnaissance à grand rendement - LCPC Nantes.

Lagabrielle R., 1986, *Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil*, Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussée, série géotechnique, mécanique des sols, sciences de la Terre, GT-17

Fauchard C., Cote P., Mériaux P., à paraître 2004 – *Mesures complémentaires par RMT et méthode Slingram (EM 31) sur la digue de l'Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque*, rapport du PN CRITERRE

Hollier-Larousse A., 2001, *Reconnaissance géophysique par radio- magnéto tellurique – Digue de l'Agly à Saint Laurent la Salanque - Projet national Criterre – Thème anomalie physique - Reconnaissance à grand rendement*, Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussée

Mériaux P., Hollier-Larousse A., Derobert X., 2003, *Reconnaissance géophysique des digues de l'Agly après la crue de novembre 1999 – contribution à l'élaboration d'une méthode de diagnostic*, colloque Geofcan, septembre 2003

Fry J-J., 2004. *Présentation du projet national IREX sur l'érosion interne*, colloque CFGB 2004.