

5

LES MÉTHODES DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE À GRAND RENDEMENT – ESSAIS *IN SITU*



5.1 Choix des méthodes et critères d'implantation des reconnaissances

Dans le cadre du projet national CriTerre, de nombreux rapports d'études géotechniques ont été réalisés : ceux-ci ont été consultés pour la rédaction de cette partie dont ceux de Wakselman (1999), Waschkowski (2001), Dupont (2000), Mieussens et Rojat (2002), ainsi que le guide méthodologique de Lino, Mériaux et Royet (2000). Les méthodes présentées sont plutôt des méthodes « légères », à grand rendement, c'est-à-dire dont le résultat peut être lu *in situ* (la notion de rendement est ici différente de celle des méthodes géophysiques).

L'implantation des essais géotechniques peut être réalisée selon un programme de reconnaissance systématique. Mais il est conseillé, après concertation entre le géophysicien et le géotechnicien, de la réaliser en fonction des résultats des études préalables, en particulier ceux des méthodes géophysiques, lesquels ont théoriquement permis de déterminer des zones plus ou moins hétérogènes dont les caractéristiques

méritent d'être mieux définies par la géotechnique. L'expérience des interpréteurs permet alors d'extrapoler les résultats des essais locaux entièrement ou pour partie au reste de la digue. Il permet aussi de déterminer les zones d'implantation des méthodes géophysiques locales (en particulier pour les profils transversaux réalisés avec le panneau électrique), différentes de celles définies par les méthodes géophysiques à grand rendement.

La vérification locale de paramètres géotechniques apporte immédiatement une richesse supplémentaire au diagnostic. C'est aussi une étape indispensable pour interpréter les mesures géophysiques.

5.2 Essais pénétrométriques : PANDA

5.2.1 Principe

Le pénétromètre autonome numérique dynamique assisté par ordinateur (PANDA) est un pénétromètre dynamique à énergie variable, dont l'essai consiste à enfoncer une pointe située au bout d'un train de tige à l'aide d'un marteau normalisé actionné manuellement. L'énergie de battage est fournie en partie à la pointe qui pénètre à chaque coup dans le sol sur une profondeur dépendant de la résistance du sol.

L'appareil, mis au point par le laboratoire de génie civil du CUST de Clermont-Ferrand (Gourves, 1991), mesure à chaque coup l'enfoncement du train de tige et la vitesse de la tête de battage.

5.2.2 Résultat attendu

Le résultat attendu de la mesure est l'enfoncement de la tige (en m) mesuré à chaque coup de marteau, et la valeur de la résistance à la pénétration dynamique Q_d , qui se calcule par la formule des « Hollandais » (figure 54). Le résultat brut obtenu est un pénétrogramme qui représente Q_d en fonction de la profondeur de l'enfoncement (en m). Un lissage est généralement appliqué sur les courbes obtenues.

5.2.3 Condition d'application

La formule des Hollandais est valable si :

- le sol a un comportement plastique parfait durant la pénétration ;
- le frottement latéral sur le train de tige est négligeable et la totalité de l'énergie fournie est transmise à la pointe, le choc étant considéré parfaitement mou ;
- la pression interstitielle dans le sol est négligeable.

5.2.4 Interprétation des résultats

L'étude de la résistance à la pénétration dynamique en fonction de la profondeur renseigne sur la nature et la compacité des terrains traversés. Cette interprétation est

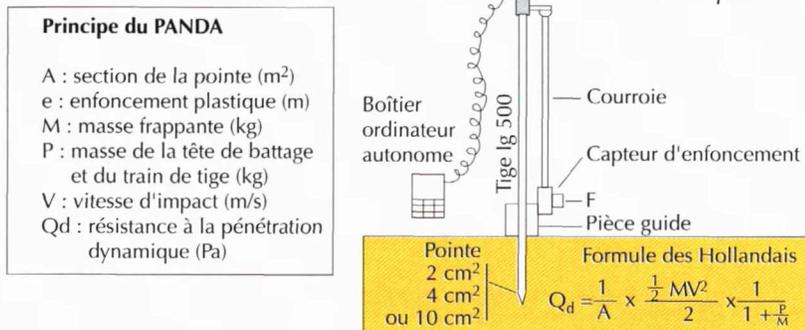


Figure 54 – Principe du PANDA et formule des Hollandais

d'autant plus fine que les connaissances *a priori* sur les constituants de la digue sont bonnes. Les résultats des études préalables et des forages sont donc essentiels. Les variations relatives de résistance peuvent mettre en évidence la présence de vides. La résistance dynamique dépendant de la teneur en eau, la connaissance du niveau piézométrique est importante et la méthode est préférentiellement utilisée sur des digues à sec.

5.2.5 Exemple de résultat

Le résultat suivant a été obtenu sur la digue du Cher (figure 21). Il est corrélé avec les résultats d'un sondage destructif (SD 108 sur la figure 55). Il met en évidence :

- une chaussée goudronnée suivie d'une zone de remblai, l'épaisseur totale est d'environ 2,5 m ;
- le corps de digue composé d'une couche de limons argileux de 4 m d'épaisseur ;
- la fondation de la digue située à environ 6,5 m de profondeur et composée de sables et de graviers.

5.2.6 Limites et avantages

Le PANDA (Deplagne *et al.*, 1993) est *a priori* sensible à des variations de résistance dynamique qui ne sont pas nécessairement détectables sur les forages. Comme pour tous les essais pénétrométriques, des pics de résistance peuvent ainsi être dus à la présence d'hétérogénéités localisées, pas toujours représentatives de l'ensemble du milieu. Sa profondeur d'investigation est comprise entre 5 et 10 m suivant les matériaux. C'est un dispositif léger, aisé à mettre en œuvre, précis pour le repérage des interfaces et la reconnaissance de la compacité du corps de digue (de hauteur inférieure à 10 m).

Essai N°7 lissé, PK5915 // SD 108

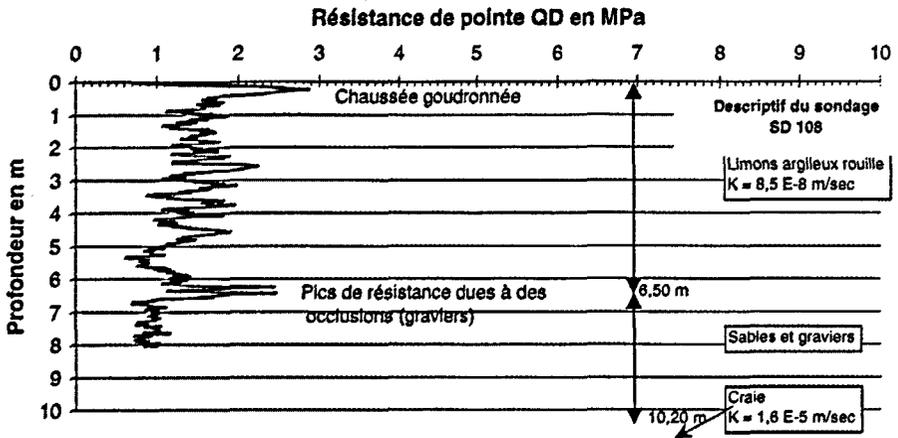


Figure 55 – Exemple de résultats obtenus avec le PANDA – Corrélation avec un sondage destructif (Doc. EDG)

5.2.7 Caractéristiques de l'appareillage

- Longueur du train de tiges : 0,5 m. Diamètre : 14 mm.
- Pointes fixes de 2 cm² ou pointes perdues de 4 ou 10 cm².
- Boîtier d'acquisition étanche pour l'enregistrement des mesures de résistance et d'enfoncement.
- Poids total de 20 kg environ.
- Capacité de stockage de 4 000 mesures, correspondant à une journée de mesure.
- Connexion possible à un PC, pour le transfert et la visualisation *in situ*.
- Travail recommandé à deux opérateurs pour la rapidité et une meilleure sécurité.

5.3 Essais pénétrométriques : Pénétrömètre dynamique lourd (LCPC)

5.3.1 Principe

L'essai au pénétromètre dynamique lourd (norme NF.P.94-114) consiste à battre une pointe débordante et conique de 30 cm² de section et de 90° d'angle en sommet, avec un mouton mécanique de 32,6 ou 96 kg, tombant d'une hauteur de 76 cm. Le

relevé du nombre de coups pour un enfoncement de 10 cm permet de calculer la résistance dynamique unitaire, q_d . Pour éviter le frottement latéral sur les tiges, à l'arrière de la pointe, une injection de bentonite est assurée en cours de battage.

5.3.2 Résultat des mesures

La mesure obtenue est la variation de la résistance dynamique de pointe q_d (en MPa) en fonction de la profondeur de pointe (en m).

5.3.3 Interprétation des résultats

L'interprétation est identique à celle présentée pour le PANDA.

5.3.4 Exemple de résultat

Le résultat suivant (figure 56) est une comparaison des essais au PANDA et au pénétromètre lourd, réalisés sur la digue du Cher (figure 21). La superposition des deux pénétrogrammes montre une bonne corrélation entre les deux méthodes, le pas d'avancement du PANDA étant plus fin (1 mm à 2 cm) que celui du pénétromètre lourd (10 cm). La détermination de la position des interfaces est en revanche plus nette avec ce dernier.

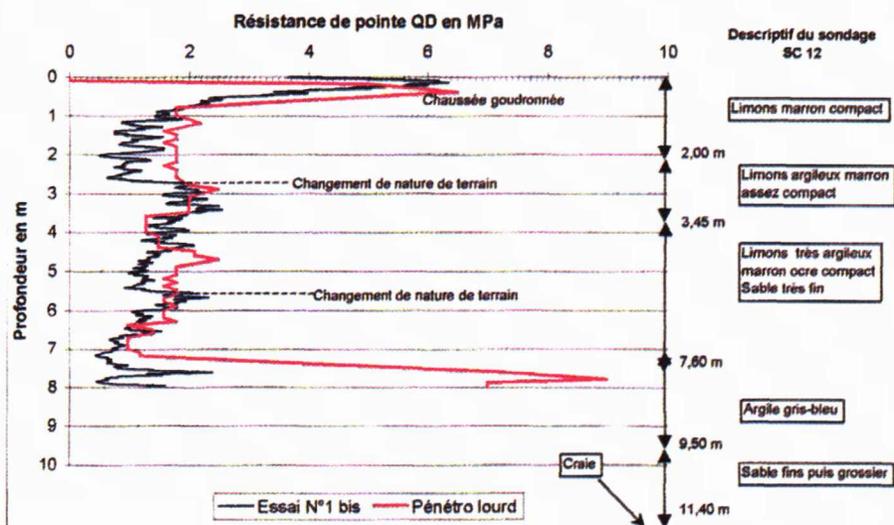


Figure 56 – Comparaison des essais au PANDA et au pénétromètre lourd

5.3.5 Caractéristiques techniques

- Masse normalisée du mouton : 64 kg.
- Autres masses possibles : 35,5 ; 96 ; 128 kg.
- Hauteur de chute : 0,75 m.

- Cadence de la frappe : 20 à 30 coups/minute.
- Section de la pointe : 30 cm².
- Longueur d'une tige : 1 m.
- Masse d'une tige de forage : 4 kg.
- Tête d'injection pour banc de forage : $L = 4,50\text{m}$; $l = 1,50\text{m}$.
(dimensions)

5.3.6 Conclusion des essais pénétrométriques

La comparaison entre le PANDA et le pénétromètre lourd montre que les résultats des méthodes sont proches, pour le sol fin étudié. Le pénétromètre lourd signe plus nettement mais moins précisément les interfaces entre matériaux et permet des investigations plus profondes (> 10 m). Ces essais sont simples à réaliser et rapides à exécuter. Les informations recueillies permettent une interprétation rapide en termes de compacité des sols et d'épaisseur de couches.

5.4 Essais de perméabilité Lefranc

5.4.1 Le principe

L'essai Lefranc (figure 57), pratiqué lors de la foration, consiste, d'une part, à injecter ou à pomper de l'eau dans une cavité de forme cylindrique appelée lanterne, limitée par le fond et une partie de la paroi du forage, ouverte dans le terrain dont on veut connaître la perméabilité, et, d'autre part, à mesurer les variations de charge et le débit correspondant.

Deux types d'essai se distinguent :

- **l'essai à niveau constant** : cet essai est réalisé dans les sols perméables ($k > 10^{-4}$ m/s). L'eau est pompée et injectée à débit constant dans la cavité jusqu'à la stabilisation du niveau dans le forage. Cet essai nécessite un matériel important (citerne ou pompe et tuyauterie adaptée). Sa mise en œuvre est aisée et l'interprétation des résultats est simple.
- **l'essai à niveau variable**, normalement réalisé sous nappe, dans les sols saturés : un volume d'eau donné ou injecté ou prélevé dans la lanterne. Les variations de niveau sont suivies dans le tube piézométrique. Cet essai s'applique plutôt à des sols peu perméables. Il nécessite peu de matériel (20 à 60 litres d'eau). Il est simple à réaliser, mais son interprétation est plus délicate.

L'essai Lefranc demande un volume d'eau beaucoup plus important pour les sols non saturés car, pendant la première partie de l'essai, il faut saturer le terrain. Pour les digues à sec, dont les parties investiguées sont situées majoritairement au-dessus de la nappe, l'essai à niveau constant reste le mieux indiqué.

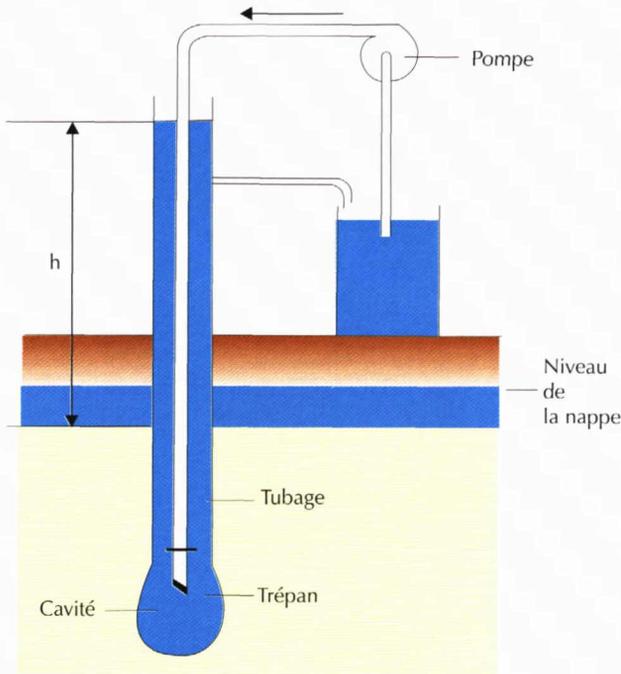


Figure 57 – Schéma de principe de l'essai Lefranc

5.4.2 Grandeur mesurée

Le résultat des mesures donne la perméabilité locale autour de la lanterne.

5.4.3 Conclusion

L'essai Lefranc est un essai simple et peu coûteux. Il donne accès à la perméabilité des sols peu perméables. Il nécessite cependant une mise en œuvre et une interprétation par un géotechnicien expérimenté.

5.5 Essais de perméabilité avec le Perméafor

5.5.1 Principe

C'est un essai similaire à l'essai Lefranc par injection, avec débit contrôlé et charge constante (Ursat, 1992 et 1995). Il est réalisé à l'aide :

- d'un module de forage et d'essai d'eau, foncé dans le sol grâce à une machine de sondage classique travaillant en vibropercussion (battage) ;

- d'un module de commande et de mesure de débit ;
- d'un module d'acquisition et de traitement.

L'espacement faible entre les points de mesure permet d'obtenir une diagraphie de perméabilité horizontale.

5.5.2 Résultats attendus

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de rapport entre le débit injecté Q (en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) et la charge effective H (en m) au niveau de la lanterne.

La durée de l'essai (10 s) ne permet pas d'obtenir un écoulement permanent dans les sols moyennement ou peu perméables. Les valeurs de perméabilité ne sont alors interprétables que pour les sols les plus perméables ($> 10^{-3} \text{ m}.\text{s}^{-1}$). L'enregistrement de la vitesse d'avancement de l'outil de forage permet en outre d'apprécier la compacité des sols.

5.5.3 Conditions d'application

L'essai s'applique préférentiellement sur les sols moyennement à fortement perméables (de 10^{-3} à $5,10^{-3} \text{ m}.\text{s}^{-1}$). Les interprétations quantitatives dans les sols peu perméables sont déconseillées. La profondeur d'investigation est limitée par les performances du matériel de forage (classiquement de 20 à 30 m). Le rendement de l'essai est de l'ordre de 30 à 60 m par jour avec la procédure classique : un essai de 10 s tous les 20 cm.

5.5.4 Caractéristiques de l'appareil

- Dimensions du module Perméafor : $72 \times 105 \times 180 \text{ cm}$.
- Essai réalisé au fur et à mesure du fonçage.
- Crépine de mesure cylindrique de 5 cm de hauteur et de 6 cm de diamètre, soit une hauteur de forage intéressée de 10 cm. Parties renflées de part et d'autre de la crépine, jouant le rôle d'obturateurs.
- Cinq à dix mesures par mètre de forage.
- Temps d'un essai standard : 10 s.
- Écoulement quasi horizontal dans le sol au niveau de la crépine.
- Calcul permanent des pertes de charge dans l'appareillage, permettant de prendre en compte la pression effective de l'écoulement au niveau de la crépine.
- Interprétation immédiate sur le chantier.
- Deux opérateurs pour l'essai : un pour le Perméafor, un pour le forage.

5.5.5 Conclusion

Cet essai est rapide et facile à mettre en œuvre avec des moyens classiques de forage. Il permet la mesure quasi continue de la perméabilité horizontale le long du forage. L'enregistrement de la vitesse d'avancement permet en outre d'obtenir une informa-

tion supplémentaire sur la compacité du sol. Il nécessite cependant un accès au site de mesure par véhicule. Il ne convient pas aux sols peu perméables, et l'interprétation quantitative exige la réalisation d'essais classiques.

5.6 Essais de cisaillement avec le phicomètre

5.6.1 Principe

Le phicomètre (Philipponat et Zerhouni, 1993) permet de mesurer directement dans un forage la résistance au cisaillement des sols. Cette caractéristique mécanique est obtenue sans être obligé de prélever des échantillons intacts dans le sol. Cette méthode est donc bien indiquée pour la caractérisation de sols grossiers ou hétérogènes.

Le phicomètre est une sonde introduite dans le forage, constituée de coquilles métalliques munies de dents annulaires horizontales. Ces coquilles sont rigides verticalement, mais peuvent se déplacer latéralement de façon à ce que les dents pénètrent dans le sol.

5.6.2 Grandeur mesurée

La contrainte s , normale à la paroi du forage, est maintenue constante à l'aide d'une cellule gonflable. Un effort de traction est exercé sur le train de tige jusqu'à rupture du sol par cisaillement le long de la surface cylindrique S . On obtient ainsi la contrainte de cisaillement à la rupture.

L'essai est répété pour des valeurs croissantes de s . On a alors plusieurs points représentatifs dans le plan de Mohr, qui permettent de tracer la droite intrinsèque et évaluer l'angle de frottement j_i et la cohésion résiduelle à court terme C_r .

5.6.3 Conditions d'application

Les essais sont réalisés au fur et à mesure de l'avancement du forage par alternance des phases de forage puis d'essai.

La qualité du forage doit être surveillée.

Un étalonnage doit être effectué pour déterminer la surface de cisaillement en fonction du volume de la sonde.

Cinq à huit paliers successifs de cisaillement à s constant doivent être réalisés ; l'arrachement à vitesse constante est de 2 mm/mn jusqu'à un déplacement de 7 mm par palier.

La gamme des valeurs de contrainte normale est à déterminer en fonction de la valeur (mesurée ou estimée) de la pression limite P_l à l'essai pressiométrique P_r .

La méthode ne s'applique pas aux sols mous ($P_l < 0,3$ à $0,5$ MPa).

La durée d'un essai est d'environ une heure.

Le rendement est d'environ quatre essais par jour.

5.6.4 Caractéristiques de l'appareil

- Sonde du phicomètre relié à un contrôleur pression-volume.
- Train de tige passant en surface au travers d'un vérin creux et d'une cale dynamométrique permettant d'appliquer et de mesurer l'effort de traction.
- Diamètre de la sonde : 58 mm au repos, 80 mm en expansion maximale.
- Longueur utile de la sonde : 230 mm.
- Diamètre du forage : 60 à 66 mm.
- Nécessité d'une excellente qualité de forage.

5.6.5 Limites et avantages

Le forage doit être d'excellente qualité sans tubage, ce qui peut être difficile dans les sols très hétérogènes. Cet essai n'est pas adapté aux sols mous. En revanche, c'est l'un des seuls essais *in situ* permettant d'avoir la contrainte de cisaillement et l'angle de frottement des sols, y compris pour certains matériaux impossibles à prélever pour des essais en laboratoire (graves, alluvions sous nappe, argile à silex...).

5.7 Sondages à la pelle mécanique

Ce type de sondage consiste à creuser une fosse dans le corps de digue ou en son pied pour vérifier *in situ* la disposition des matériaux. Il est conseillé de réaliser cette fosse « en pyramide inversée », pour que la réparation qui suivra l'examen visuel permette un compactage adéquat des matériaux.

Cet essai rustique est simple à réaliser et peu coûteux, dès lors que l'accès aux sites à investiguer est possible pour une pelle mécanique. Le prélèvement d'échantillons remaniés est conseillé. Il convient, cependant, de veiller à ce qu'aucune personne ne descende dans la fosse et de prendre toutes les précautions qui s'imposent vis-à-vis des risques d'éboulement des parois de la fosse.

5.8 Les forages mécaniques

Étape incontournable pour l'interprétation des mesures géophysiques, les forages permettent de prélever localement des échantillons de terrain. Ils sont généralement instrumentés, et la **vitesse d'avancement** est aujourd'hui au moins un des paramètres quasi-systématiquement enregistrés lors de la foration. Les forages sont de deux types : les forages carottés et les forages destructifs.

5.8.1 Les forages carottés

a) PRINCIPE

Les forages carottés sont une technique non destructive de prélèvement des échantillons du sol. La méthode est lourde et assez coûteuse, mais elle permet de donner des caractéristiques précises de la répartition et des caractéristiques mécaniques des matériaux dans la digue. C'est par ailleurs à partir de ces échantillons intacts que les essais de laboratoire pourront être menés.

Le carottier est foncé dans le sol au bout d'un train de tige. Il est choisi de façon à permettre le prélèvement d'échantillons de classe 1, au sens de la norme P 94-202, pour une identification complète et une détermination des propriétés mécaniques en laboratoire de mécanique des sols. Le diamètre des échantillons prélevés est généralement compris entre 75 et 100 mm.

b) RÉSULTAT D'UN FORAGE CAROTTÉ

Les échantillons prélevés dans le sol, les carottes, sont soigneusement repérés, placés dans des caisses en bois, décrits et photographiés par le géotechnicien. Les descriptions et les informations recueillies au cours de la foration seront pris en compte lors de l'interprétation des logs de sondage.

Les échantillons prélevés destinés à des essais de laboratoire sont immédiatement conditionnés avec précaution de façon à préserver leur teneur en eau (paraffine) et leur structure (conteneur), étiquetés (référence, date et mode de prélèvement, profondeurs point haut et point bas par rapport au terrain naturel), puis entreposés dans un local adapté, à l'abri des chocs, du soleil et des intempéries, jusqu'à leur prise en charge par le laboratoire.

c) CONDITIONS D'APPLICATION

Pour les sols fins à dominante sableuse, l'outil de prélèvement est du type poinçonneur à piston stationnaire. Pour les sols très sableux, le prélèvement d'échantillons de classe 1 est parfois impossible. Pour les roches ou les sols fins raides, les carottiers rotatifs sont utilisés. L'exécution de ces sondages doit être réalisée en présence d'un géotechnicien expérimenté.

5.8.2 Les forages destructifs

a) PRINCIPE

Ils consistent à prélever les matériaux à l'aide d'outils désagrégateurs, à les remonter vers la surface à l'aide d'un fluide de circulation ou d'une trousse hélicoïdale sous forme de fragments (*cutting*) ou copeaux. Ils sont réalisés :

- soit à la tarière mécanique, où l'outil de prélèvement est constitué d'une trousse hélicoïdale coupante de 100 à 300 mm de diamètre ;
- soit au marteau fond de trou ou au tricône (diamètre d'environ 100 mm), avec façonnage de l'outil par percussion ou rotoperçussion et injection d'un fluide de circulation.

b) CONDITIONS D'APPLICATION

Les sondages à la tarière sont adaptés aux terrains meubles et peu cohérents, les sondages par percussion sont adaptés aux terrains cohérents ou rocheux.

Le sondage à la tarière permet une description aisée et assez fine des matériaux. Elle autorise le prélèvement d'échantillons de classe 3, au sens de la norme P 94-202, pour des essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau...).

L'interprétation des sondages par percussion ou rotopercussion est plus délicate, car elle se base sur l'observation des *cutting* remontés, de façon plus ou moins différée et irrégulière, par le fluide de circulation. L'enregistrement des paramètres de foration (vitesse d'avancement, pression sur l'outil, pression du fluide de circulation...) permet d'affiner l'interprétation.

De même, la présence d'un géotechnicien et un carnet d'observation judicieusement rempli sont recommandés pour la mise en œuvre et l'interprétation des résultats du forage.

c) AVANTAGES ET LIMITES

Les forages destructifs ou non destructifs donnent une information précise sur la structure du sol : ils permettent un calibrage local des mesures géophysiques. Le trou de forage peut être équipé d'un instrument d'auscultation type piézomètre ou inclinomètre. Enfin, le forage carotté permet le prélèvement d'échantillons intacts pour une analyse plus poussée en laboratoire.

Le coût reste relativement élevé pour une information ponctuelle. Ces méthodes nécessitent un accès et une emprise suffisante au sol pour le déploiement de l'engin de forage. Enfin, les résultats des mesures sur les échantillons carottés ne donnent que des renseignements ponctuels sur la constitution du corps de digue ou de sa fondation.

6

SYNTHÈSE MÉTHODOLOGIQUE DES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES POUR LE DIAGNOSTIC À GRAND RENDEMENT DES DIGUES À SEC



6.1 Rappel du contexte de l'étude

Les digues sont des ouvrages à grand linéaire (plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres), d'une hauteur comprise entre 3 et 12 m, cette fourchette variant suivant les levées et le niveau des crues qu'elles sont censées contenir.

Le diagnostic de ce type d'ouvrage doit permettre de déterminer le niveau de sécurité de la digue, de relever ses points de faiblesse, ses défauts et ses dysfonctionnements, pour ensuite définir les travaux qui permettent de remédier aux insuffisances constatées ou d'envisager un diagnostic plus approfondi.

L'étude doit débiter par une prise en compte de tous les composants de la digue et de l'ensemble des systèmes dans lesquels elle s'inscrit. Les méthodes utilisées doivent être potentiellement à grand rendement, et rendre compte, de manière aussi précise que possible, des singularités de l'ouvrage, susceptibles d'évoluer vers des dommages irréversibles et lourds de conséquences (surverses et brèches en particulier) lorsque le cours d'eau est en crue.

Pour atteindre cet objectif, la méthodologie suivante est proposée.

6.2 Phases d'étude du diagnostic

La méthodologie générale de diagnostic est présentée sur la figure 58. Elle comporte trois étapes principales :

- les études préalables ;
- les reconnaissances géophysiques ;
- les reconnaissances géotechniques.

Deux cheminements d'étude sont possibles, selon que l'on effectue les méthodes géophysiques de reconnaissance locale suite aux méthodes à grand rendement (en bleu, figure 58), ou bien suite aux essais géotechniques (en orange, figure 58).

6.2.1 Les études préalables

Le diagnostic débute ainsi nécessairement par une **étude historique** de l'ouvrage. Il s'accompagne d'une **étude géologique**, d'une **analyse morphodynamique** du cours d'eau, d'un **relevé topographique** en long et en travers de la digue et d'une **inspection visuelle** sur tout le linéaire.

Ces étapes sont longues et exigent une pluridisciplinarité dans les compétences et la méthode de travail. Mais elles sont essentielles pour l'interprétation des mesures des étapes suivantes.

6.2.2 Les méthodes géophysiques

Le diagnostic se poursuit par le déploiement de **méthodes géophysiques à grand rendement**. Elles mesurent une grandeur physique permettant de déduire la répartition des matériaux dans le corps de digue et jusqu'à sa fondation. Le résultat de cette phase doit permettre de délimiter des portions de digue plus ou moins hétérogènes, généralement de dimensions décamétriques, révélant les changements de constitution de l'ouvrage, ou bien de repérer des singularités traversant le corps de digue, comme des canalisations.

À ce jour, les méthodes les plus adaptées à la problématique du grand rendement sont les **méthodes électromagnétiques basse fréquence de type Slingram** (à deux boucles), qui renseignent sur la répartition des matériaux par la mesure de la **résistivité apparente ρ_a ($\Omega.m$)**, grandeur inverse de la conductivité apparente relative au phénomène de conduction électrique dans les sols. Si ces méthodes ne sont pas applicables, la **Radio-MT** peut être envisagée avec les réserves déjà présentées. Si la hauteur de digue est faible (< 5 m), et si les matériaux sont relativement résistants (> 100 $\Omega.m$), alors le radar géologique peut être déployé.

Il est aujourd'hui vivement préconisé d'appliquer sur les zones délimitées par les méthodes géophysiques à grand rendement, des **méthodes géophysiques de reconnaissance locale**, au rendement plus faible mais aux résultats plus fins, permettant de mieux préciser la répartition des matériaux. Cette étape peut intervenir à la suite des méthodes à grand rendement, ou bien après les essais géotechniques.

Pour les digues à sec, les expérimentations menées dans le cadre du projet national CriTerre et dans d'autres contextes ont montré la richesse des informations que peuvent donner les mesures de résistivité apparente en **panneau électrique en courant continu**. Cette méthode permet, en particulier, d'obtenir une tomographie transversale ou longitudinale de l'ouvrage.

La détection de l'interface entre le corps de digue et sa fondation est aussi souvent très recherchée : la **sismique réfraction** est ainsi une méthode bien adaptée au suivi des contacts entre couches, si la vitesse des ondes sismiques croît en fonction de la profondeur.

Pour l'ensemble des méthodes, l'interprétation d'un géophysicien expérimenté est vivement recommandée.

Une façon de s'assurer de la qualité de mise en œuvre et d'interprétation des prospections géophysiques à réaliser sur un site donné serait d'exiger, dans le cahier des charges des études de diagnostic, la conduite préalable, sous la responsabilité et à la charge du prestataire, d'un **essai de répétabilité** de la (des) méthode(s) employée(s) sur un tronçon-test de la digue judicieusement choisi, avec interprétation et commentaires des résultats par le géophysicien expérimenté. Une telle disposition contractuelle ne paraît, toutefois, raisonnablement envisageable que pour les méthodes à plus haut rendement (Slíngram, Radio-MT, radar...).

À ce stade du diagnostic, les résultats des études préalables corrélés avec les résultats des études géophysiques devraient permettre une première interprétation du modèle de la digue. Mais ce n'est pas suffisant pour livrer un diagnostic exhaustif et de qualité. Il est impératif de réaliser la phase d'étude géotechnique.

6.2.3 Les méthodes géotechniques

Les méthodes géotechniques à grand rendement sont des méthodes permettant de vérifier certaines caractéristiques des matériaux *in situ*. Les **essais pénétrométriques** sont ainsi systématiquement déployés sur les digues. Ils permettent de rendre compte rapidement de la stratification de l'ouvrage, et donnent un ordre de grandeur qualitatif des propriétés mécaniques des matériaux.

Les **essais Lefranc et au Perméafor** permettent de connaître, le long du forage, la perméabilité horizontale des sols en place. Ce sont des essais simples et peu coûteux. L'enregistrement de paramètres, comme la vitesse d'avancement de l'outil foreur, permet, en outre, d'enrichir l'interprétation des mesures quant à la compacité des sols traversés.

Les **forages carottés** sont plus coûteux mais très riches d'information. Ils permettent de prélever directement des échantillons intacts de sol pour des essais en laboratoire de mécanique des sols, où les caractéristiques mécaniques, la nature et la granulométrie des matériaux pourront être étudiées. Les sondages destructifs, moins coûteux que les forages carottés, sont plus rustiques mais peuvent être utilisés pour conduire des essais *in situ* et pour installer des instruments d'auscultation (par exemple, piézomètre).

La plupart des appareils de forage sont aujourd'hui instrumentés, et permettent au moins d'obtenir la **vitesse d'avancement** de l'outil, paramètre qui renseigne immédiatement sur la stratification et les propriétés mécaniques des sols traversés.

Enfin, l'**essai au phicomètre** permet d'évaluer directement dans le forage la contrainte de cisaillement des matériaux, y compris pour ceux qui ne sont pas extractibles avec les forages carottés.

Pour l'ensemble des essais, l'interprétation et l'assistance dans la mise en œuvre d'un géotechnicien expérimenté sont vivement recommandées.

6.3 Restitution des résultats géophysiques et géotechniques

La restitution des résultats des études préalables est présentée dans deux guides méthodologiques déjà publiés (Mériaux *et al.*, 2001 ; Lino *et al.*, 2000).

Le bilan d'une étude géophysique et géotechnique présente généralement les aspects suivants :

- une présentation du cadre et du site de l'étude (coupe de digue et plan), repérés selon un système de coordonnées valable pour toutes les étapes du diagnostic (études préalables, géophysique, géotechnique) ;
- une synthèse des observations recueillies lors des études préalables (inspection visuelle, indices historiques et étude géologique). À ce titre, il est impératif pour le géophysicien d'avoir le plus d'éléments possibles sur les caractéristiques de la digue. À défaut, la méthode est déployée « en aveugle », et ne pourra fournir que des résultats partiels ;
- un descriptif synthétique des méthodes déployées ;
- une présentation des mesures (profils, cartes, logs, tableau) repérées selon le système de coordonnées fixé initialement et les unités usuelles. Les résultats des mesures géophysiques doivent être commentés et corrélés impérativement avec les informations disponibles. Les résultats des sondages sont tout d'abord présentés indépendamment, et généralement comparés à la coupe supposée ou déjà disponible de l'ouvrage. Il est conseillé d'en reporter la synthèse sur les résultats géophysiques, afin de faire apparaître les corrélations entre les grandeurs mesurées ;

DIAGNOSTIC GEOPHYSIQUE ET GEOTECHNIQUE A GRAND RENDEMENT POUR LES DIGUES A SEC

I - ETUDES PREALABLES

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

II - RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE A GRAND RENDEMENT

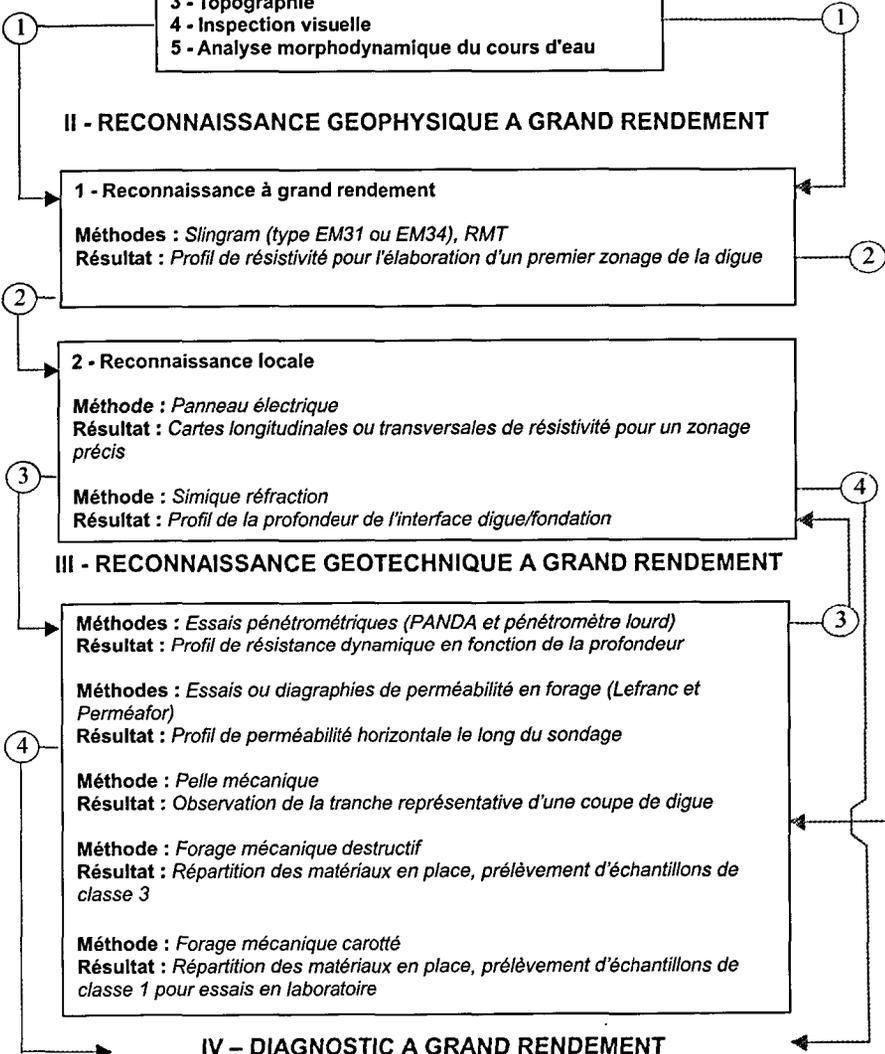
- 1 - Reconnaissance à grand rendement**
- Méthodes :** *Slingram (type EM31 ou EM34), RMT*
Résultat : *Profil de résistivité pour l'élaboration d'un premier zonage de la digue*

- 2 - Reconnaissance locale**
- Méthode :** *Panneau électrique*
Résultat : *Cartes longitudinales ou transversales de résistivité pour un zonage précis*
- Méthode :** *Simique réfraction*
Résultat : *Profil de la profondeur de l'interface digue/fondation*

III - RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE A GRAND RENDEMENT

- Méthodes :** *Essais pénétrométriques (PANDA et pénétromètre lourd)*
Résultat : *Profil de résistance dynamique en fonction de la profondeur*
- Méthodes :** *Essais ou diagraphies de perméabilité en forage (Lefranc et Perméafor)*
Résultat : *Profil de perméabilité horizontale le long du sondage*
- Méthode :** *Pelle mécanique*
Résultat : *Observation de la tranche représentative d'une coupe de digue*
- Méthode :** *Forage mécanique destructif*
Résultat : *Répartition des matériaux en place, prélèvement d'échantillons de classe 3*
- Méthode :** *Forage mécanique carotté*
Résultat : *Répartition des matériaux en place, prélèvement d'échantillons de classe 1 pour essais en laboratoire*

IV - DIAGNOSTIC A GRAND RENDEMENT



Synthèse méthodologique des techniques géophysiques et géotechniques pour le diagnostic à grand rendement des digues à sec

Figure 58 – Méthodologie générale pour le diagnostic des digues et cheminements possibles des études. En bleu, les méthodes géophysiques locales sont déployées après les méthodes à grand rendement ; en orange, après les essais géotechniques cités

– une conclusion présentant la synthèse de l'étude à grand rendement. Elle doit aider à la prise de décision par les maîtres d'ouvrage pour les travaux à réaliser ou pour la définition de nouvelles études plus poussées sur certaines portions. Des essais de laboratoire et des études de modélisation peuvent alors être envisagés.

Pour garantir la qualité des prestations rendues, les résultats des méthodes géophysiques et géotechniques doivent être interprétés respectivement par un géophysicien et un géotechnicien expérimentés.

6.4 Comparaison des méthodes géophysiques

Suivant les expérimentations menées dans le cadre du projet national CriTerre et d'autres rapports de laboratoires et de bureaux d'études, un classement des méthodes géophysiques est proposé figure 59. Elles répondent à la problématique du diagnostic à grand rendement sur les digues à sec. L'efficacité des méthodes réside dans leur aptitude à ausculter le corps de digue et la partie supérieure de sa fondation, et à localiser les hétérogénéités susceptibles d'être présentes dans le corps des digues (répartition des matériaux plus ou moins conducteurs, canalisations, circulations d'eau...).

La **méthode électromagnétique Slingram** est la plus adaptée au diagnostic de digue, car elle permet *a priori* une auscultation dans la gamme des hauteurs typiques de ce type d'ouvrage. Elle peut être à grand rendement pour les digues carrossables en crête, et pour des profondeurs de l'ordre de 6 m. Pour les plus grandes profondeurs (10 à 15 m), le rendement est de l'ordre de la vitesse de marche du ou des opérateurs. L'information recueillie est la résistivité apparente. C'est une donnée globale relative à la répartition des matériaux dans un volume de digue défini par la profondeur d'investigation de la méthode.

Méthodes	Efficacité	Digues carrossables	Digues non carrossables
Slingram tractable (type EM31)	+++ jusqu'à 6 m	oui	
Slingram portable (type EM34)	+++		
Radio-MT	++	oui, si électrodes capacitives	oui si électrodes conductives
Panneau électrique	+++	difficile si goudronnée	oui
Panneau électrique capacitif	+	oui	non
Sismique réfraction	++	oui	oui
Radar géologique	+	oui	oui

Figure 59 – Efficacité des méthodes géophysiques pour l'auscultation des digues

Pour le cas où la méthode Slingram n'est pas applicable en crête, la **radio-MT** pourra être envisagée si la digue est carrossable en crête. Des réserves sont à émettre sur les résultats bruts de cette méthode et sur la stabilité des appareils actuels. Sur les digues, au moins trois profils répétés sont nécessaires pour obtenir une mesure exploitable.

Enfin, le **radar géologique** ne s'applique pas à la majorité des corps de digue. Mais il peut exister des configurations (digue à sec de faible hauteur et de matériau suffisamment résistant) pour que cette méthode soit mise en œuvre.

La **méthode en panneau électrique** n'est pas une méthode à grand rendement, mais elle donne une idée précise des répartitions des matériaux dans le corps de digue. Elle apparaît aujourd'hui comme un complément indispensable aux méthodes à grand rendement, et se présente à ce titre comme une méthode de calibrage géophysique local de ces méthodes.

Les principales caractéristiques de ces méthodes sont présentées sur la figure 60 :

	Profondeur d'investigation indicative	Rendement	Type de cibles	Sensibilité au bruit	Conditions nécessaires de détection
Slingram	Théoriquement jusqu'à 50 m	1 à deux km/jour pour dispositif portable, plusieurs km à quelques dizaines de km/jour pour dispositif tractable	Porfions plus ou moins résistantes et réseaux enterrés	Lignes et clôtures électriques	Milieu plutôt conducteur
Radio-MT		Faible si électrodes conductives piquées dans le sol, plusieurs km à quelques dizaines de km/j pour dispositif tractable		Topologie de la digue, ligne électrique, clôture métallique, surface en crête irrégulière	Réception des émetteurs, digue non sinueuse
Sismique réfraction	Jusqu'à 30 m	Quelques centaines de mètres par jour, pour des dispositifs d'une centaine de mètres et une distance de 1 ou 2 m entre géophones	Interface entre couches, pour des vitesses croissantes en fonction de la profondeur	Trafic, micro-séisme	Milieu de vitesse croissant avec la profondeur
Radar géologique	Inversement proportionnelle à la conductivité. Expérimentalement pour les digues, de 2 à 5m en crête, une dizaine de m en pied	Plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres par jour	Couche de chaussée, suivi de remblai et milieu sablo-graveleux	Emetteur radio, environnement métallique	Résistivité du milieu supérieur à 100Ωm
Panneau électrique	Dépend de la longueur de ligne : 1°R pour une sphère vide de rayon R. 1,5°R pour une sphère conductrice de rayon R	Quelques centaines de mètres par jour, pour des dispositifs d'une centaine de mètres et une distance de 1 ou 2 m entre électrodes	Plutôt anomalies conductrices (pendage, stratification,...)	terrain moins conducteur que la cible	/

Figure 60 – Caractéristiques principales des méthodes géophysiques pour l'auscultation à grand rendement des digues à sec

7

PROPOSITION DE DÉVELOPPEMENT OU D'ESSAI DE MÉTHODES GÉOPHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES POUR LE DIAGNOSTIC DES DIGUES



La problématique du diagnostic des digues à sec a intégré les méthodes géophysiques comme outil de reconnaissance vers la fin des années 1990. Ces méthodes, initialement prévues pour la prospection de la sub-surface, peuvent susciter de nouvelles études et recherches.

Les méthodes électromagnétiques Slingram, méthodes aujourd'hui les plus adaptées pour répondre au diagnostic à grand rendement des digues à sec, peuvent être améliorées pour cette application. En effet, le matériel permettant de faire du grand rendement, et actuellement disponible sur le marché, offre une profondeur d'investigation limitée (environ 6 m). Pour atteindre de plus grandes profondeurs, il est nécessaire d'avoir une distance entre bobines de 10 m pour atteindre les 10 m de profondeur. Cette configuration nécessite alors deux opérateurs se déplaçant à pied. Le rendement est alors faible et laisse présager des études longues et fastidieuses lorsqu'il s'agira de diagnostiquer des grandes longueurs de digue. Le développement d'un appareil Slingram adapté, tractable derrière un véhicule, apparaît donc tout à fait opportun.

Bien qu'historiquement déployée la première dans le cadre des expérimentations CriTerre, la méthode radio magnétotellurique, si elle trouve des applications plus probantes notamment dans les terrassements, souffre de plusieurs difficultés lorsqu'elle est déployée sur digues. Les effets topographiques de la digue sur le champ mesuré (sinuosité et pente des talus en particulier) ne sont pour l'instant pas maîtrisés. Le nombre d'émetteurs disponibles de fréquences proches et dont les champs sont orthogonaux au niveau du point de mesure est insuffisant. Enfin, et c'est là le souci majeur, l'utilisation de tapis capacitifs et la sensibilité des mesures aux hétérogénéités proches de la surface, diminuent notablement le rendement initialement présenté par cette méthode et la qualité de l'interprétation des résultats. L'avenir de cette méthode pour les digues pourrait passer par un développement matériel spécifique, dont le cahier des charges reste à déterminer, mais qui porterait plus particulièrement sur le type de capteur de champ électrique utilisé. Par ailleurs, des essais en méthodes « inclinaison », ne nécessitant pas l'utilisation d'un contact au sol, mériteraient d'être menés.

Enfin, d'autres méthodes sismiques ont été suggérées, en particulier la sismique réflexion haute résolution et la sismique en ondes de surface. La première peut permettre localement de déterminer les différents horizons réflecteurs, et son application n'est pas restreinte au milieu de vitesse croissant avec la profondeur. La seconde, utilisée avec un dispositif glissant, peut être envisagée à plus grand rendement. Pour ces deux méthodes, l'intérêt des résultats mériterait d'être étudié par quelques essais.

Les méthodes géotechniques à grand rendement, c'est-à-dire les méthodes permettant un contrôle des matériaux *in situ*, pourraient aussi profiter de la grande richesse d'information qu'apporte la diagraphie de radioactivité naturelle (RAN ou gamma-ray). Elle permet de mesurer la radioactivité naturelle des terrains traversés. Son principe repose sur l'émission de photons gamma par décroissance radioactive d'éléments naturels, comme l'uranium, le thorium et le potassium, et la réception de ces particules par une sonde introduite dans le forage. Dans les milieux sédimentaires, elle est intéressante pour mettre en évidence des couches argileuses, très radioactives à l'état naturel. Elle sert aussi à définir la stratification du terrain localement lorsqu'elle est pratiquée dans un seul forage, et à suivre la formation du terrain lorsqu'elle est pratiquée dans plusieurs forages. Cette méthode, très simple d'utilisation, ne présente aucune contre-indication.

Ces thématiques restent ouvertes à la discussion. L'avenir de la recherche appliquée en méthodes géophysiques et géotechniques conduira très probablement à la mise en œuvre de nouvelles méthodes, permettant de mieux répondre aux problématiques des maîtres d'ouvrages. La méthodologie proposée dans ce guide, ainsi que le descriptif des caractéristiques des méthodes présentées, intègrent les retours d'expérience actuels, obtenus lors des recherches menées au titre du projet national CriTerre et de divers chantiers de prospection récents. Ces deux aspects seront certainement amenés à évoluer dans les années à venir, à mesure que les demandes de diagnostic se formuleront et que les techniques se perfectionneront.

8

CONCLUSION



Ce guide présente une méthodologie générale de diagnostic de digue à sec, en particulier la méthodologie préconisée pour la mise en œuvre et l'interprétation de méthodes géophysiques et géotechniques adaptées. Il expose, dans une première partie, le contexte de l'étude, et décrit substantiellement les principales caractéristiques des digues concernées.

Une description synthétique des études préliminaires nécessaires au diagnostic est ensuite présentée. Il s'agit de l'étude historique, de l'étude géologique, de l'inspection visuelle, de la topographie et de l'analyse morphodynamique du cours d'eau. La partie sur les reconnaissances géophysiques présente les grandeurs physiques dont la mesure permet d'établir une répartition plus ou moins approximative des matériaux dans le corps de digue. C'est en particulier la mesure de la résistivité apparente – grandeur inverse de la conductivité apparente – liée aux phénomènes de conductivité électrique dans les sols, qui permet d'obtenir une « image » du corps de digue et d'une partie de sa fondation. Les méthodes électromagnétiques basse fréquence à grand rendement de type Slingram

(méthodes à deux boucles) sont les plus adaptées au diagnostic à grand rendement. La méthode radio magnétotellurique est présentée pour des raisons historiques, mais les différentes expérimentations et l'avis de nombreux experts ont montré les difficultés inhérentes à sa mise en œuvre et à son interprétation.

Les résultats de ces méthodes à grand rendement doivent être complétés par l'application de méthodes locales, permettant d'obtenir une répartition plus précise des matériaux en place. Il s'agit du panneau électrique en courant continu, qui donne une image transversale ou longitudinale plus ou moins grossière de la géométrie de la digue, et de la sismique réfraction, qui permet de suivre les interfaces entre le corps de l'ouvrage et sa fondation. D'autres méthodes sont présentées et peuvent être envisagées suivant les configurations, comme le radar géologique, avec les réserves énoncées pour ces méthodes.

L'interprétation des mesures géophysiques doit être impérativement corrélée avec les études préalables en amont, et avec les essais géotechniques en aval. C'est là la condition absolument nécessaire à la bonne qualité du diagnostic qui sera rendu. Les essais géotechniques sont succinctement présentés. Ce sont des essais dits à grand rendement, dans le sens où ils permettent d'obtenir *in situ* une information sur les matériaux en place dans l'ouvrage : essais au pénétromètre dynamique, essais de perméabilité, prélèvements à la pelle mécanique, forages mécaniques destructifs et carottés.

Après le respect de ces trois étapes (études préliminaires, reconnaissance géophysique et reconnaissance géotechnique), le diagnostic à grand rendement de la digue à sec peut être pleinement formulé. Les nombreuses études consultées pour ce guide montrent que, pour l'ensemble de ces étapes, l'intervention de professionnels expérimentés (géophysicien, géotechnicien, spécialiste des ouvrages hydrauliques) est nécessaire à la conduite d'une étude de qualité.

Ce guide a tenté de révéler tous les aspects méthodologiques pour établir un diagnostic d'une digue à sec. Il a été rédigé après la consultation de nombreuses études, réalisées par des bureaux d'études privés et des institutions publiques, et après l'écoute des conseils de plusieurs professionnels de la géotechnique, de la géophysique appliquée et des ouvrages hydrauliques, pour essayer d'arriver à un consensus sur les méthodes proposées. Il ne prétend pas être la règle de l'art en la matière, mais vise plutôt à fournir un outil d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre chargés de conduire des études de diagnostic de digues à sec.

BIBLIOGRAPHIE**● ● ● Rapports et communications rédigés dans le cadre du projet national CriTerre****Site expérimental du Cher**

Dupont L. (2000), *Diagnostic de l'état des digues de la Loire : reconnaissance des anomalies géotechniques (dossier n° CRT/00/1/005)*, CETE de Blois/Projet national CriTerre.

Mériaux P., Royet P., Côte Ph., Hollier-Larousse A., Frappin P. (2001), *Méthodes de reconnaissance géophysique à grand rendement pour les digues de protection contre les crues*, Colloque GEOFCAN, septembre 2001 à Orléans, pp. 111-115.

Waschkowski P. (2001), *Rapport de sondages*, LRPC de Blois.

Wakselman J. (1999), *Étude comparative des méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique des digues à sec : projet CriTerre d'expérimentation sur les levées de la Loire*, Mémoire DESS de géophysique appliquée, Université Pierre et Marie Curie/Cemagref.

**Site expérimental du Cher :
rapports consultés et non cités dans le guide**

Dondaine E. (1999), *Projet CriTerre 1.3 – Méthodes de reconnaissance à grand rendement – application aux digues, levée du Cher*

au confluent avec la Loire – Prospection par panneau, traîné électrique et sismique réfraction, Rapport EDG.

Hollier-Larousse A. (2000), *Reconnaissance géophysique par radio- magnétotellurique : projet national CriTerre, thème anomalies physiques, reconnaissance à grand rendement*, LCPC Nantes/Projet national Criterre.

Hollier-Larousse A., Folton C., Mériaux P., Wakselman J., Frappin P., Côte P., Royet P. (2000), *Étude comparative des méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique des digues à sec – site d'expérimentation de la digue du Cher à Savonnières, Rapport général de recherches*, LCPC de Nantes/Cemagref/EDG/Projet national CriTerre.

Hollier-Larousse A., Mériaux P., Waschkowski P., Mieussens C. (2002), *Les hétérogénéités des digues de protection contre les inondations : leur signature géophysique et géotechnique*, Journées AGAP 2002.

Waschkowski P. (2000), *Détection des anomalies et contrôle des améliorations des sols – Diagnostic de l'état des digues de Loire*, Rapport technique, Projet national Criterre, LRPC Blois, juillet.

Site expérimental de l'Agly

Frappin P. (2001), *Étude géophysique dans le secteur de l'Agly – prospection géophysique [EM31, panneaux électriques]*, EDG/Projet national CriTerre.

Hollier-Larousse A. (2001a), *Reconnaissance géophysique par radio-magnétotellurique : Digue [rive gauche] de l'Agly à Saint-Laurent-de-La-Salanque 2000-2001 – Projet national CriTerre, thème anomalies physiques, reconnaissance à grand rendement*, LCPC Nantes/Projet national CriTerre.

Hollier-Larousse A. (2001b), *Reconnaissance géophysique par radio-magnétotellurique : Digue [rive droite] de l'Agly à Pia 2000-2001 – Projet national CriTerre, thème anomalies physiques, reconnaissance à grand rendement*, LCPC Nantes/Projet national CriTerre.

Mieussens C., Rojat F. (2002), *Reconnaissance des digues de l'Agly – Essais au pénétromètre dynamique. Communes de Pia et de Saint-Laurent-de-la-Salanque*, LRPC de Toulouse.

Mériaux P., Hollier-Larousse A., Dérobert 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 à Paris.

Fauchard C., Mériaux P. (2004), *Les méthodes de reconnaissance à grand rendement adaptées aux digues de protection contre les inondations*, colloque CFGB, 25 et 26 novembre 2004, Orléans.

Site expérimental de l'Agly : rapports consultés et non cités dans le guide

Dérobert X. (2001), *Agly : Radar géophysique [commune de Saint-Laurent-de-la-Salanque]*, LCPC de Nantes.

Fauchard C., Mériaux P, Durand O. (à paraître 2004), *Répétitivité de la méthode Radio-MT sur les digues de l'Agly. Thème anomalie physique – Reconnaissance à grand rendement*, LCPC Nantes, Cemagref.

Hollier-Larousse A., Mériaux, P., Waschkowski, P., Mieussens, C. (2002), *Les hétérogénéités des digues de protection contre les inondations : leur signature géophysique et géotechnique*, Journées AGAP 2002.

Hollier-Larousse A., Folton C., Mériaux P., Frappin P., Luquet C. (à paraître 2004), *Méthodes géophysiques et géotechniques à grand rendement pour la reconnaissance des digues à sec. Site d'expérimentation des digues de l'Agly*, Rapport général de recherches, LCPC de Nantes/Cemagref/EDG/Projet national CriTerre.

Articles, guides et autres rapports

AGAP-collectif (1992), *Code de bonne pratique en géophysique appliquée – 75 fiches et guide d'application*. Edition AGAP Qualité.

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

Bitri A., Perrin J., Beauce A. (1996), *Sismique réflexion haute résolution : principe et applications*, Rapport du Bureau de recherche géologique et minière R 39220, 59 pages.

Bosch F.P et Müller I. (2001), *Continuous gradient VLF measurements : a new possibility for high resolution mapping of karst structures*, *First Break*, 10 (6), pp. 343-350.

Bourgeois B., Suignard K. et Perrusson G. (2000), *Electric and magnetic dipoles for geometric interpretation of three-component electromagnetic data in geophysics*, *Inverse Problems*, Vol. 16, pp. 1225-1261.

Braham P.J. McDonald R.J. (1992), « Imaging a buried river channel in an intertidal area of South Wales using high resolution seismic techniques », *Quarterly Journal Engineering Geology*, Vol. 25, pp. 227-238.

Cagniard L. (1953), « Principe de la magnéto-tellurique, nouvelle méthode de la prospection géophysique », *Annales de géophysique*, tome 9, fascicule 2.

Chevassu G., Grisoni J.-C., Lagabrielle R. (1990), « Utilisation de la magnétotellurique pour l'auscultation du sol-support de chaussée », *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées*, N° 166, pp. 73-82.

Chouteau M. (2001), *Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques*, Géophysique appliquée II, GLQ 3202, Notes de cours, École polytechnique de Montréal.

Combes P.F. (1996), *Mico-ondes 1. Lignes, guides et cavités*, Paris, Dunod.

Daniels D.J., Gunton D.J., Scott H.F. (1988), « Introduction to subsurface radar », *IEE Proceedings*, Vol. 135, Pt. F, N° 4.

- Daniels D.J. (1996), « Surface Penetrating Radar », *IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics*, Series 6.
- Davis J.-L., Annan A.P. (1989), « Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy », *Geophysical Prospecting*, 37, pp. 531-551.
- Degoutte G. (1992), *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens*, Paris, Cemagref.
- Degoutte G. coord. (1997), *Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*, Paris, CFGB/Cemagref Éditions.
- Deplagne F., Bacconnet C., Royet P. (1993), *Intérêt du pénétrromètre léger pour le contrôle du compactage des barrages en terre*. Journées nationales d'études « Petits Barrages », AFEID-CFGB – 2 et 3 février 1993.
- Eyraud L., Grange G. et Ohanessian H. (1973), *Théorie et technique des antennes*, Paris, Librairie Vuibert.
- Gourves R. (1991), *Le PANDA. Pénétrromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols*, Laboratoire de génie civil. CUST. Université Blaise-Pascal.
- Guérin R., Tabbagh A., Benderitter Y., Andrieux A. (1994), « Invariants for correcting field polarisation effect in MT-VLF resistivity mapping », *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 32, pp. 375-383.
- Halbecq W. (1996), *Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire*, Mémoire DEA de l'Université d'Orléans.
- Hollier-Larousse A. (1997), *Contribution à la valorisation d'une méthode géophysique électromagnétique utilisée en géophysique appliquée de subsurface : la radio magnéto-tellurique*, Rapport du Conservatoire national des arts et métiers, Paris.
- Lagabrielle R. (1986), *Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil*, Rapport des laboratoires des Ponts et chaussées.
- Lino M., Mériaux P., Royet P. (2000), *Méthodologie de diagnostic des digues appliquées aux levées de la Loire moyenne*, Paris, Cemagref Éditions.
- Loke M.H. (1999-2002), *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, Practical guide to 2D and 3D surveys.
- Mari J.-L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P. (1998), *Géophysique de gisement et de génie civil*, Publications de l'Institut français du pétrole, Paris, Éditions Technip.
- McNeill J.-D., Labson V. (1991), « Geophysical mapping using VLF radio fields », dans M. N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 2, part B, pp. 521-640.
- McNeill J.-D. (1980a), *Electrical conductivity of soil and rocks*, Technical Notes TN-5, Geonics Limited.
- McNeill J.-D. (1980b), *Electrical terrain conductivity measurement at low induction numbers*, Technical Notes TN-6, Geonics Limited.

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*, Geofcan.

Mériaux P., Royet P. et Folton C. (rééd. 2004), *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*, Guide pratique à l'usage des gestionnaires, Paris, Cemagref Éditions.

Militzer M., Rösler R., Lösch W. (1979), « Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods », *Geophysical Prospecting*, Vol. 27, pp. 640-652.

Miller R.D., Pullan S.E., Waldner J.-S., Haeni F.P. (1986), « Field comparison of seismic sources », *Geophysics*, Vol. 51, pp. 2067-2092.

Parasnis D.S. (1986), *Principles of applied geophysics*, Chapman and Hall, 4^e éd.

Palacky G.J. (1991), « Resistivity characteristics of geological targets », dans M. N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 1, pp. 53-129.

Philipponat G., Zerhouni M. (1993), *Interprétation de l'essai au phicomètre*, *Revue française de géotechnique*, n° 65, pp. 3-28.

Spies B.R. and Frischknecht F.C. (1991), « Electromagnetic sounding, Electromagnetic methods in applied geophysics », dans M. N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 2, part A, pp. 285-386.

Tabbagh A., Benderitter Y., Andrieux P., Decriaud J.-P., Guérin R. (1991), « VLF resistivity mapping and verticalization of the electric field », *Geophysical Prospecting*, Vol. 39, pp. 1083-1097.

Roy A., Apparao A. (1971), « Depth of investigation in direct current methods », *Geophysics*, 36 (5), pp. 943-959.

Ursat P. (1995), *Le Perméafor, un appareil bien adapté à l'analyse des fuites dans les digues en terre*, 11^e Conférence européenne de méca-sols et travaux de fondation, 28 mai – 1^{er} juin 1995, Copenhague.

Ursat P. (1992), « Le Perméafor. Appareillage de diagraphie de perméabilité », *Bulletin de liaison des Ponts et chaussées*, Vol. 178, Réf. 3641, pp. 19-26.

West G.F. et Macnae J.-C. (1991), « Physics of the electromagnetic induction exploration method, Electromagnetic methods in applied geophysics », dans M. N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 2, part A, pp. 5-45.

CRÉDIT PHOTOGRAPHIQUE

Introduction, p. 9

Zone localisée de surverse réparée côté val sur la digue rive gauche de l'Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque, suite aux dégâts de la crue des 12/13/11/1999, P. Mériaux.

Chapitre 2, p. 13

Digue du Petit-Rhône siège de fuites, lors de la crue du 8 janvier 1994, P. Mériaux (8/01/1994).

Chapitre 3, p. 25

Allure typique d'une levée de la Loire moyenne, P. Mériaux.

Chapitre 4, p. 39

Mise en œuvre de la méthode Slingram (appareil EM 31), Société EDG.

Chapitre 5, p. 91

Sondages au pénétromètre dynamique léger, P. Mériaux.

Chapitre 6, p. 103

Prospection géophysique par RMT, P. Mériaux.

Chapitre 7, p. 111

Panoramique de la brèche de St-Laurent-de-la-Salanque, Éric Josse (DDE 66).

Conclusion, p. 113

Recharge drainante aval construite après la crue du 8 janvier 1994 sur la digue du petit Rhône en Arles ; piste de service aménagée au sommet de la recharge – la crête de digue demeurant non carrossable, P. Mériaux.

**LISTE
DES FIGURES**

● ● ●	Figure 1 – Coupe type d’une vallée endiguée	14
	Figure 2 – Expansion d’une crue en lit majeur endigué (Mériaux <i>et al.</i> , 2001)	14
	Figure 3 – Inondation d’un val par remous ou par ruissellement du bassin versant ou remontée de la nappe phréatique (Mériaux <i>et al.</i> , 2001)	15
	Figure 4 – Fonctionnement d’un déversoir (Mériaux <i>et al.</i> , 2001)	15
	Figure 5 – Coupe type des levées de Loire avant confortements récents en fonction des travaux consécutifs aux crues historiques (Dion, 2001)	16
	Figure 6 – Coupe type de confortement côté fleuve de la digue de Fondettes-Luynes – Projet DDE Indre-et-Loire (1997)	17
	Figure 7 – Coupe type de digue des aménagements hydroélectriques du Rhône (Mériaux <i>et al.</i> , 2001, d’après CNR)	17
	Figure 8 – Coupe type de déversoir sur la digue de Montliveaut (Loire-et-Cher) (1890) (Lino <i>et al.</i> , 2000)	18
	Figure 9 – Principe de la surverse	20
	Figure 10 – Principe de l’érosion externe et des affouillements	20

Figure 11 – Facteurs naturels (a) et anthropiques (b) aggravant l'érosion interne	21
Figure 12 – Positionnement des profils sur une digue	32
Figure 13 – Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Palacky, 1991)	33
Figure 14 – Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche : cas d'un système Slingram en dipôle magnétique vertical (2 boucles coplanaires posées sur le sol, configuration HCP ou mode VD) (Chouteau, 2001)	40
Figure 15 – a) Réponses des dispositifs verticaux et horizontaux à une couche conductrice située à une profondeur d en fonction de la profondeur normalisée $z = d/s$ avec s la distance entre bobines. b) L'intégration de ces réponses sur la profondeur z $R_H(z)$ et $R_V(z)$ donne la réponse cumulative de chaque tranche de terrain pour les deux types de dispositif	42
Figure 16 – Représentation qualitative d'un profil Slingram au-dessus d'une digue avec une anomalie résistante et une anomalie conductrice	43
Figure 17 – Mode de mesure adopté sur digue avec l'appareil EM31	44
Figure 18 – Profils de résistivité apparente EM31, rive gauche, côté val sur la digue de l'Agly (Doc. EDG)	46
Figure 19 – Comparaison entre un profil obtenu avec un point tous les 5 m, et un profil en continu avec une mesure par seconde	47
Figure 20 – Deux profils Slingram en mode HD, côté val et côté fleuve, permettent d'apprécier le degré d'hétérogénéité transversal de la digue (Doc. EDG)	46
Figure 21 – Coupe en travers de la digue du Cher (hameau de Grand Moulin, rive droite du Cher en aval de Tours)	48
Figure 22 – Mesure EM34 selon deux profondeurs d'investigation sur la digue du Cher	48
Figure 23 – Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain, polarisations et modes de mesure	51
Figure 24 – Profondeur de pénétration en fonction de la résistivité apparente pour quelques fréquences usuelles	53
Figure 25 – Répétitivité des mesures Radio-MT sur chaussée (8 passages successifs à 711 kHz)	54
Figure 26 – Principe du dispositif Radio-MT du LCPC	55
Figure 27 – Anomalie de résistivité apparente d'une structure métrique en fonction de la distance entre capteurs (Lagabrielle, 1986)	56

Figure 28 – Exemple de mesures Radio-MT sur les digues de l'Agly (Mériaux <i>et al.</i> , 2003)	57
Figure 29 – Comparaison de quatre profils Radio-MT côté fleuve. <i>a)</i> profils bruts, <i>b)</i> profils filtrés	59
Figure 30 – Comparaison de quatre profils Radio-MT côté val. <i>a)</i> profils bruts, <i>b)</i> profils filtrés	60
Figure 31 – Mesures comparatives entre méthode Radio-MT et méthode Slíngram	63
Figure 32 – Comparaison des mesures Radio-MT et Slíngram sur la digue de l'Agly	64
Figure 33 – Principe du radar géologique	65
Figure 34 – <i>a)</i> Signal radar, <i>b)</i> exemple de radargramme interprété réalisé à une fréquence centrale $f_c \approx 200$ MHz (Doc. LRPC Saint-Brieuc)	66
Figure 35 – Représentation en régime harmonique des champs électrique et magnétique suivant le vecteur \vec{k} , vecteur de propagation, ici dirigé suivant (Oz)	66
Figure 36 – Radargramme avec mise en évidence de la brèche, réalisé à 500 MHz dans l'axe de la chaussée (Mériaux <i>et al.</i> , 2003)	71
Figure 37 – Principe de la prospection électrique par courant continu	72
Figure 38 – Dispositifs et facteurs géométriques associés (Loke, 2002)	74
Figure 39 – Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner	75
Figure 40 – Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner	75
Figure 41 – Principe du panneau électrique	76
Figure 42 – Exemple de mesure en panneau électrique sur une portion de digue de l'Isère (Doc. IMS)	78
Figure 43 – Exemple de mesure en panneau électrique sur une digue de l'Isère. Le profil est transversal (Doc. IMS)	79
Figure 44 – Comparaison de mesures en panneau électrique et en méthode Slíngram (EM31) (Frappin, 2001)	80
Figure 45 – Exemple de mesures réalisées avec un panneau électrique capacitif selon deux profils en crête de digue de l'Isère (Doc. IMS)	81
Figure 46 – Principe des méthodes sismiques	82
Figure 47 – Lois de Snell-Descartes	82
Figure 48 – <i>a)</i> Principe de la réfraction des ondes sismiques avec représentation des tirs en offset direct et inverse, <i>b)</i> représentation qualitative d'un sismogramme brut, <i>c)</i> dromochronique et <i>d)</i> coupe interprétée	84

Figure 49 – Sources sismiques – à gauche, exemple de tir réalisé avec une source de surface (marteau). À droite, tir réalisé avec une source enterrée (cordeau détonateur) sur le même site (Braham et McDonald, 1992)	86
Figure 50 – Représentation qualitative de la réponse d'un géophone 100 Hz	87
Figure 51 – Système d'acquisition en sismique réfraction	88
Figure 52 – Coupe du canal du Centre (Doc. CETMEF, d'après Bièvre et Norgeot (2004)	89
Figure 53 – Dromochroniques (en haut) et mesures inversées représentant les vitesses en fonction de la profondeur (Doc. CETMEF, d'après Bièvre et Norgeot (2004)	89
Figure 54 – Principe du PANDA et formule des Hollandais	93
Figure 55 – Exemple de résultats obtenus avec le Panda – Corrélation avec un sondage destructif (Doc. EDG)	94
Figure 56 – Comparaison des essais au PANDA et au pénétromètre lourd	95
Figure 57 – Schéma de principe de l'essai Lefranc	97
Figure 58 – Méthodologie générale pour le diagnostic des digues et cheminements possibles des études. En bleu, les méthodes géophysiques locales sont déployées après les méthodes à grand rendement ; en orange, après les essais géotechniques cités	107
Figure 59 – Efficacité des méthodes géophysiques pour l'auscultation des digues	108
Figure 60 – Caractéristiques principales des méthodes géophysiques pour l'auscultation à grand rendement des digues à sec	109



Ce guide propose une méthodologie générale en trois étapes pour l'élaboration d'un diagnostic à grand rendement des digues à sec.

La première étape consiste à recueillir le plus d'informations possible sur la digue, par l'analyse des archives, l'interview du gestionnaire et une inspection visuelle des ouvrages. Cette phase est capitale pour la qualité du diagnostic.

La deuxième étape – la reconnaissance géophysique – a pour but principal de réaliser un zonage de la digue, visant à identifier les tronçons de l'ouvrage dont les caractéristiques physiques diffèrent et où la crue pourrait engendrer des dommages irréversibles. Les méthodes géophysiques utilisées doivent permettre l'auscultation de grands linéaires et révéler l'hétérogénéité de la digue (sur toute sa hauteur) et de sa fondation.

La troisième étape – la reconnaissance géotechnique – comprend différents essais et forages, qui permettent de déterminer *in situ* les principales caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs de l'ouvrage.

Utile à l'ensemble des acteurs impliqués dans la sécurité des digues, ce guide apportera tous les éléments nécessaires notamment aux maîtres d'œuvre, bureaux d'études et maîtres d'ouvrages, pour établir, de façon optimale, le diagnostic des digues, et engager des travaux ou des études plus approfondies.