



Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues



Cyrille
Fauchard

Guide pour la mise en œuvre
et l'interprétation

Patrice
Mériaux



Cemagref
EDITIONS

**Méthodes géophysiques
et géotechniques**
pour le diagnostic des digues
de protection contre les crues

Guide pour la mise en œuvre et l'interprétation

Cyrille FAUCHARD, Patrice MÉRIAUX



Cemagref
EDITIONS

Ce guide a été réalisé dans le cadre du projet national CriTerre, labellisé par le réseau génie civil et urbain (RGCU), subventionné par la direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer (METATM) et piloté par l'IREX, institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil.

Ont, en outre, contribué au financement et/ou à l'encadrement de ces travaux : le LCPC de Nantes, le Cemagref Aix-en-Provence, la société EDG, l'agence de l'Eau Loire-Bretagne (Équipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature) et le syndicat intercommunal de l'Agly maritime.

Cyrille Fauchard (LRPC Rouen) et Patrice Mériaux (Cemagref, Aix-en-Provence) tiennent aussi à remercier :

- particulièrement Gérard Degoutte - Cemagref Aix-en-Provence - pour sa relecture attentive et son aide précieuse à la rédaction de ce guide ;
- les personnes suivantes pour leur relecture : Alain Tabbagh et Roger Guérin (UPMC Paris 6), Richard Lagabrielle et Philippe Côte (LCPC, Nantes), Pierre Frappin, (EDG),
- Paul Royet et Rémy Tourment (Cemagref, Aix-en-Provence) ;
- les personnes suivantes pour les discussions et les documents fournis : Alain Hollier-Larousse (LCPC, Nantes), Viviane Borne (Calligée, Nantes), Bernard Bourgeois (BRGM, Orléans), Gregory Bièvre (LRPC, Autun), Olivier Magnin (Terraseis) ;
- les organismes suivants pour la consultation ou la reproduction de documents : le CETMEF, l'association départementale Isère-Drac-Romanche, la société IMS (Montbonnot), l'IUT de Saint-Nazaire, la DDE d'Indre-et-Loire, le bureau Safège (Nanterre), le LRPC de Saint-Brieuc.

© 2004 Cemagref-Éditions, IREX. Photographies de couverture - Panoramique de la brèche de St Laurent-la-Salanque (© Éric Josse DDE 66), digues de l'Agly : bêche parafouille de pied de berge partiellement emportée suite à la crue des 12/13/11/1999 (© Patrice Mériaux).

Coordination de l'édition : Julienne Baudel. Mise en pages : Desk, 23 bd de la Vannerie 53940 Saint-Berthevin. Infographie : Françoise Cedra, Françoise Peyriguer. Impression Jouve, 11 bd Sébastopol, BP 2734 75027 Paris cedex 01. ISBN 2-85362-643-1. 1^{re} édition. Dépôt légal : 4^e trimestre 2004. Diffusion : Publi-Trans, ZI Marinière 2, rue Désir-Prévost, 91080 Bondoufle, tél. 01 69 10 85 85-Diffusion aux libraires : Tec et Doc Lavoisier, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex. **Prix : 38 € TTC**

SOMMAIRE

● ● ● 1 INTRODUCTION	9
2 PROBLÉMATIQUE DU DIAGNOSTIC GÉNIE CIVIL DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES CRUES	13
2.1 Nature, fonctions et constitution des digues	13
2.1.1 Définition	13
2.1.2 Fonctionnement d'un système d'endiguement	14
2.1.3 Constitution d'une digue	16
2.2 Typologie des désordres et mécanismes de rupture	19
2.2.1 La surverse	19
2.2.2 Érosions externes et affouillements côté fleuve	20
2.2.3 Érosion interne (ou renard hydraulique)	21
2.2.4 Glissement de talus	22
2.3 Diagnostic d'un ouvrage	23
2.3.1 Définition du diagnostic	23
2.3.2 Particularités du diagnostic des digues	23
3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE POUR LE DIAGNOSTIC À GRAND RENDEMENT DES DIGUES À SEC	25
3.1 Introduction	25

3.2 Phases d'études préalables : la recherche d'indices	26
3.2.1 Recherche historique	26
3.2.2 Étude géologique	27
3.2.3 Analyse morphodynamique	28
3.2.4 Topographie – Données de repérage (Lino <i>et al.</i> , 2000)	28
3.2.5 Inspection visuelle (Lino <i>et al.</i> , 2000)	29
3.3 La reconnaissance géophysique	31
3.3.1 Principe et objectif de la reconnaissance géophysique	31
3.3.2 Quelles grandeurs physiques faut-il mesurer pour le diagnostic des digues ?	32
3.3.3 Méthodes géophysiques privilégiées pour le diagnostic des digues	34
3.4 La reconnaissance géotechnique	36
3.4.1 Principe et objectif de la reconnaissance géotechnique	36
3.4.2 Méthodes géotechniques privilégiées pour le diagnostic des digues	37
3.4.3 Programme de reconnaissance systématique et/ou optimisé	38
4 LES MÉTHODES DE RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES	39
4.1 Reconnaissance à grand rendement avec la méthode Slingram	40
4.1.1 Principe	40
4.1.2 Grandeur mesurée en méthode Slingram	41
4.1.3 Profondeur d'investigation	41
4.1.4 Résultats attendus	42
4.1.5 Méthodologie	43
4.1.6 Interprétation des résultats	45
4.1.7 Exemples de mesure	45
4.1.8 Conclusion	49
4.2 Reconnaissance à grand rendement avec la méthode radio magnétotellurique	49
4.2.1 Principe	49
4.2.2 Grandeurs mesurées en Radio-MT	50
4.2.3 Corrections des mesures en mode résistivité : verticalisation et invariants	52
4.2.4 Profondeur de pénétration	52
4.2.5 Résultats attendus	53
4.2.6 Méthodologie	53
4.2.7 Interprétation des mesures	55
4.2.8 Exemples de mesures	57
4.2.9 Conclusion	58

4.3 Comparaison des méthodes électromagnétiques Slingram et Radio-MT à grand rendement sur les digues à sec	61
4.3.1 Le rendement des méthodes	61
4.3.2 La profondeur d'investigation	61
4.3.3 La répétitivité des mesures	62
4.3.4 Les corrélations entre les deux types de mesures	62
4.4 Autre reconnaissance à grand rendement : le radar géologique	62
4.4.1 Principe	64
4.4.2 Résultats attendus	65
4.4.3 Modélisation	67
4.4.4 Méthodologie – Déroulement d'une campagne de mesures	67
4.4.5 Quelques caractéristiques des matériels de mesure	69
4.4.6 Interprétation des mesures	70
4.4.7 Exemple de résultats	71
4.4.8 Conclusion	71
4.5 Reconnaissance locale avec le panneau électrique	72
4.5.1 Principe des méthodes électriques	72
4.5.2 Le panneau électrique	76
4.6 Reconnaissance locale avec la sismique réfraction	81
4.6.1 Principe	81
4.6.2 Grandeurs mesurées	83
4.6.3 Résultats attendus	83
4.6.4 Méthodologie	85
4.6.5 Exemple de mesure	88
4.6.6 Conclusion	90
5 LES MÉTHODES DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE À GRAND RENDEMENT – ESSAIS <i>IN SITU</i>	91
5.1 Choix des méthodes et critères d'implantation des reconnaissances	91
5.2 Essais pénétrométriques : PANDA	92
5.2.1 Principe	92
5.2.2 Résultat attendu	92
5.2.3 Condition d'application	92
5.2.4 Interprétation des résultats	92
5.2.5 Exemple de résultat	93
5.2.6 Limites et avantages	93
5.2.7 Caractéristiques de l'appareillage	94
5.3 Essais pénétrométriques : pénétromètre dynamique lourd (LCPC)	94
5.3.1 Principe	94

5.3.2	Résultat des mesures	95
5.3.3	Interprétation des résultats	95
5.3.4	Exemple de résultat	95
5.3.5	Caractéristiques techniques	95
5.3.6	Conclusion des essais pénétrométriques	96
5.4	Essais de perméabilité Lefranc	96
5.4.1	Le principe	96
5.4.2	Grandeur mesurée	97
5.4.3	Conclusion	97
5.5	Essais de perméabilité avec le Perméafor	97
5.5.1	Principe	97
5.5.2	Résultats attendus	98
5.5.3	Conditions d'application	98
5.5.4	Caractéristiques de l'appareil	98
5.5.5	Conclusion	98
5.6	Essais de cisaillement avec le phicomètre	99
5.6.1	Principe	99
5.6.2	Grandeur mesurée	99
5.6.3	Conditions d'application	99
5.6.4	Caractéristiques de l'appareil	100
5.6.5	Limites et avantages	100
5.7	Sondages à la pelle mécanique	100
5.8	Les forages mécaniques	100
5.8.1	Les forages carottés	101
5.8.2	Les forages destructifs	101
6	SYNTHÈSE MÉTHODOLOGIQUE DES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES POUR LE DIAGNOSTIC À GRAND RENDEMENT DES DIGUES À SEC	103
6.1	Rappel du contexte de l'étude	103
6.2	Phases d'étude du diagnostic	104
6.2.1	Les études préalables	104
6.2.2	Les méthodes géophysiques	104
6.2.3	Les méthodes géotechniques	105
6.3	Restitution des résultats géophysiques et géotechniques	106
6.4	Comparaison des méthodes géophysiques	108

7 PROPOSITION DE DÉVELOPPEMENT OU D'ESSAI DE MÉTHODES GÉOPHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES POUR LE DIAGNOSTIC DES DIGUES	111
8 CONCLUSION	113
Bibliographie	115
Liste des figures	121

1

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. En outre, 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 tout 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 » et globales 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 absent lors des reconnaissances ;

– leur grande longueur pose, en termes particulièrement accentués, le problème de l'optimisation technico-économique des reconnaissances.

Tout cela justifie les recherches expérimentales qui ont été menées de 1998 à 2004 par le LCPC de Nantes et le Cemagref d'Aix-en-Provence, au titre du projet national de recherches « CriTerre » (Amélioration des sols et contrôle des sols renforcés – axe « Détection des anomalies dans les sols »), piloté par l'TREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil). Ces recherches visaient à tester et à 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 ces outils.

Ces travaux permettent aujourd'hui à ce guide de voir le jour. Il propose une méthodologie générale en trois étapes pour le diagnostic à grand rendement des digues à sec. La réalisation de la première phase du diagnostic, intitulée « études préalables », constitue la condition initiale et nécessaire de l'étude. Elle consiste à recueillir – par une recherche et une analyse d'archives, par des entretiens avec le gestionnaire et par une inspection visuelle des ouvrages – le plus d'informations possible 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 soumise. La qualité du diagnostic tient tout d'abord au respect de cette phase de l'étude.

La deuxième phase d'étude – la reconnaissance géophysique – a pour but principal de réaliser un zonage des portions hétérogènes 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). Les

méthodes géophysiques utilisées doivent répondre au moins aux deux impératifs suivants : ausculter de grands linéaires et rendre compte du degré d'hétérogénéité de l'ouvrage sur toute sa hauteur (y compris sa fondation). Les informations recueillies, à corrélérer avec les études préalables, conduisent à délimiter des zones particulières pour implanter, d'une part, des méthodes d'investigation locale afin de préciser la géométrie sur une tranche horizontale ou transversale de la levée, et d'autre part, les reconnaissances géotechniques de troisième phase.

Cette troisième phase comprend différents essais et forages, qui permettent de déterminer *in situ* les principales caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs de l'ouvrage. Les résultats obtenus permettent de calibrer les mesures géophysiques, et peuvent mener au déploiement de nouvelles investigations géophysiques locales.

Le respect de ces trois étapes apporte les éléments nécessaires à l'élaboration d'une reconnaissance satisfaisante des digues à sec. La méthodologie proposée s'attarde plus longuement à décrire les méthodes géophysiques dans leur principe, leur mise en œuvre et leur interprétation. Les outils méthodologiques étaient manquants dans le domaine de la reconnaissance géophysique, contrairement aux deux autres étapes, déjà abordés dans différents guides. L'objectif de ce travail est d'apporter tous les éléments nécessaires aux acteurs concernés (maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrages), pour établir, de façon optimale, le niveau d'aléa des levées diagnostiquées et engager des travaux de confortement ou des études plus approfondies.

2

PROBLÉMATIQUE DU DIAGNOSTIC À GÉNIE CIVIL DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES CRUES



2.1 Nature, fonctions et constitution des digues

Cette partie est un résumé du chapitre 1 du guide de Mériaux *et al.* (2001).

2.1.1 Définition

La digue (synonyme : levée), au sens du présent manuel, est un ouvrage linéaire de protection contre les inondations dont au moins une partie est surélevée par rapport au lit majeur. Elle est destinée à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables. La coupe générale d'une digue est celle d'un cavalier reposant sur un sol support et séparant la zone à protéger (appelée « val ») du lit du cours d'eau. Selon les cas (figure 1), la digue est implantée en contact avec le lit mineur ou, au contraire, plus ou moins en retrait dans le lit majeur (figure 1).

Ces digues ont donc la particularité d'être très généralement à sec (c'est-à-dire qu'en dehors des crues elles ne sont pas soumises à une charge hydraulique), ce qui est un aspect d'importance pour leur mode de fonctionnement et le choix des techniques de reconnaissance.

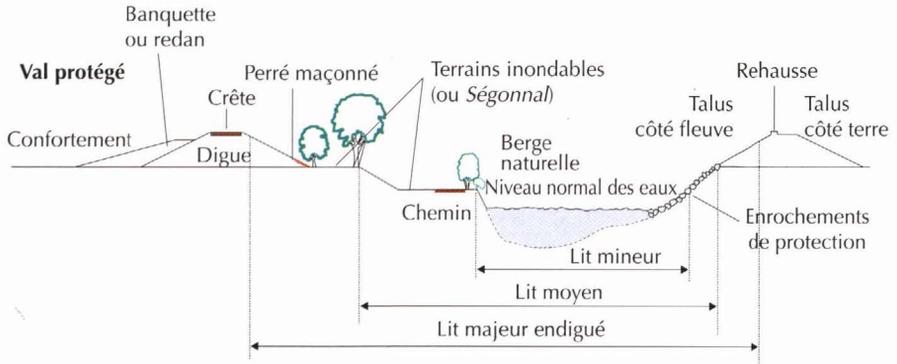


Figure 1 – Coupe type d'une vallée endiguée

2.1.2 Fonctionnement d'un système d'endiguement

Le fonctionnement d'un système d'endiguement est le suivant :

1. Lors d'une crue (figure 2), la rivière déborde de son lit mineur et envahit progressivement le lit majeur. La digue s'oppose à l'inondation du val qu'elle protège.

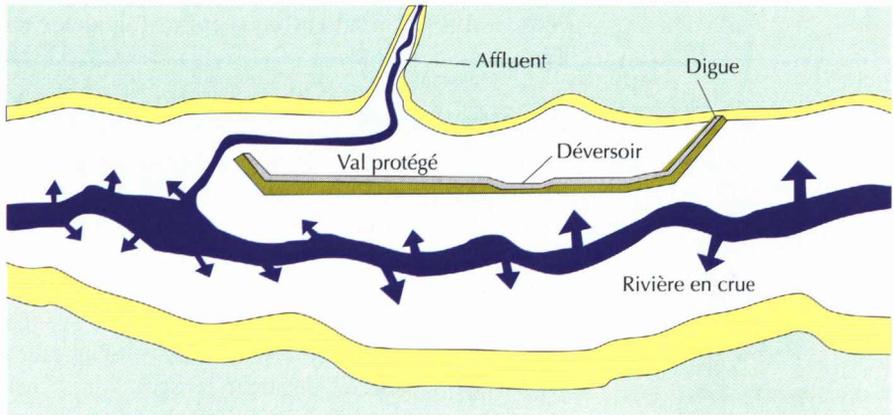


Figure 2 – Expansion d'une crue en lit majeur endigué (Mériaux *et al.*, 2001)

2. L'endiguement a pour objectif de limiter les conséquences des crues faibles et moyennes dans le val qu'il protège, mais il surélève la ligne d'eau par rapport à une situation sans digue, et ce de façon d'autant plus importante que le lit endigué est étroit (cas fréquent en zone urbaine).

3. L'écrêtement des crues (amortissement pour l'aval des débits maximaux par inondation du lit majeur) est alors limité.

4. Les zones protégées peuvent néanmoins être inondées par remontée de la nappe phréatique (figure 3), par ruissellement de versant, ou bien par le remous du fleuve à sa jonction avec un affluent.

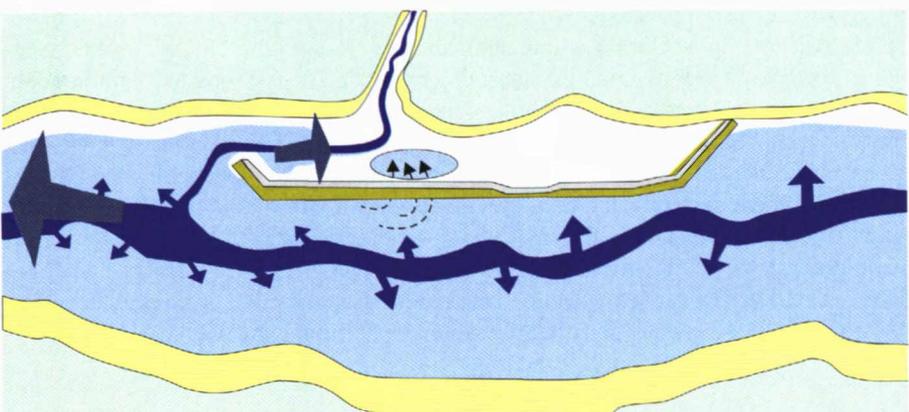


Figure 3 – Inondation d'un val par remous ou par ruissellement du bassin versant ou remontée de la nappe phréatique (Mériaux *et al.*, 2001)

5. Pour limiter le risque de surverse lors des crues fortes, des déversoirs (figure 4) sont parfois aménagés sur les digues. Ils peuvent aussi être implantés pour favoriser l'écrêtement par inondation de vals peu vulnérables.

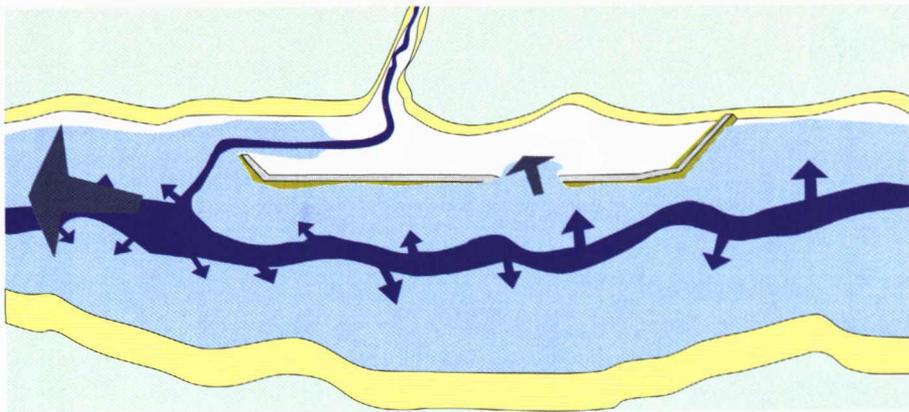


Figure 4 – Fonctionnement d'un déversoir (Mériaux *et al.*, 2001)

6. Lors des crues extrêmes, c'est l'ensemble de la vallée qui est inondé, soit à la suite du fonctionnement d'un déversoir, soit à la suite de l'apparition d'une ou plusieurs brèches dans la digue.

2.1.3 Constitution d'une digue

a) DIGUES EN REMBLAI

Une digue est en général constituée de matériaux meubles (sable, limon, argile). Ses caractéristiques morphologiques et mécaniques sont très diversifiées : elles dépendent de son implantation géographique, de son histoire, des cours d'eau qu'elle borde et des crues qu'elle est censée contenir.

La plupart des digues sont des ouvrages anciens, élaborés selon les moyens et les règles d'art de l'époque. Ainsi, les matériaux constituant les corps de digue étaient généralement prélevés à proximité de l'ouvrage (matériaux plutôt sableux dans le cours moyen, matériaux plutôt limoneux près de l'embouchure). De leur mise en place résultent des ouvrages de faible compacité, souvent peu étanches et sans clé d'étanchéité dans la fondation. Par ailleurs, les crues historiques (figure 5) ont engendré des dégâts sur les digues. Elles ont alors fait l'objet de travaux de renforcement et/ou de surélévation. Leur hétérogénéité s'en trouve encore plus marquée dans le sens transversal (par exemple, après rehaussement ou engraissement) comme dans le sens longitudinal (par exemple, après réparation d'une brèche).

Les digues sont, par conséquent, des ouvrages très hétérogènes tant par leur type que par leur constitution (figures 6 et 7).

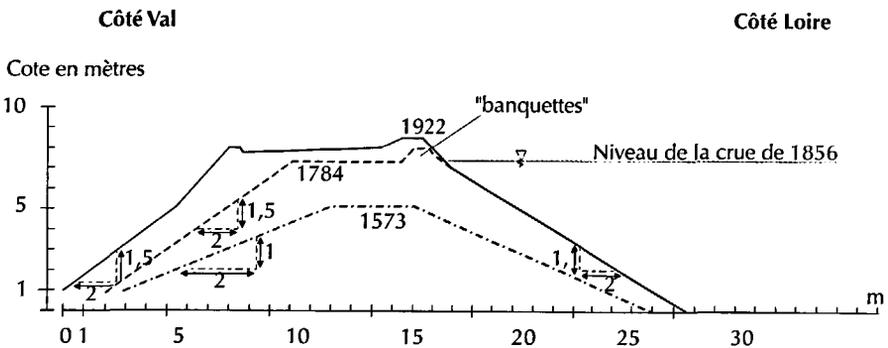


Figure 5 – Coupe type des levées de Loire avant confortements récents en fonction des travaux consécutifs aux crues historiques (Dion, 2001)

b) L'ENVIRONNEMENT IMMÉDIAT

Les talus des digues sont en général protégés par un enherbement. Du côté fleuve, un perré en maçonnerie, parfois caché sous un dépôt de limon ou de la végétation, assure souvent la protection des sections en contact avec le lit mineur.

Dans les zones exposées aux affouillements, des protections parafouilles, en général constituées de pieux jointifs, ont parfois été mises en place en pied de talus côté fleuve.

Enfin, dans le souci de réserver une revanche vis-à-vis de la crue de dimensionnement, la crête de l'ouvrage est parfois surmontée d'un merlon de terre ou d'un mur de maçonnerie, appelée banquette.

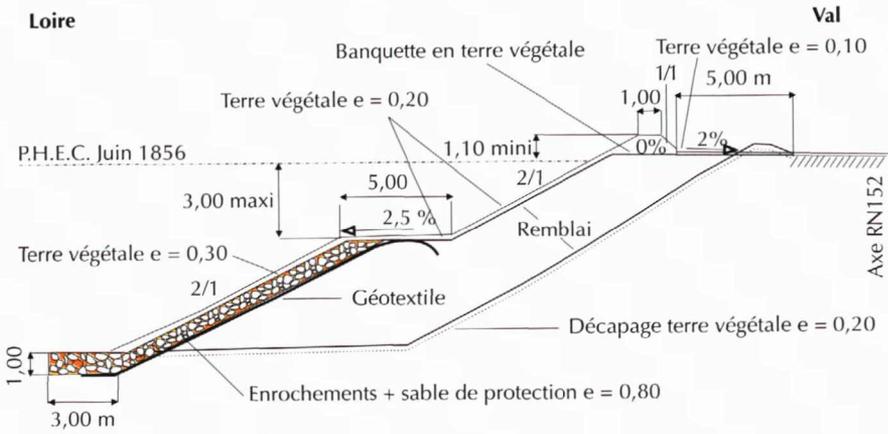
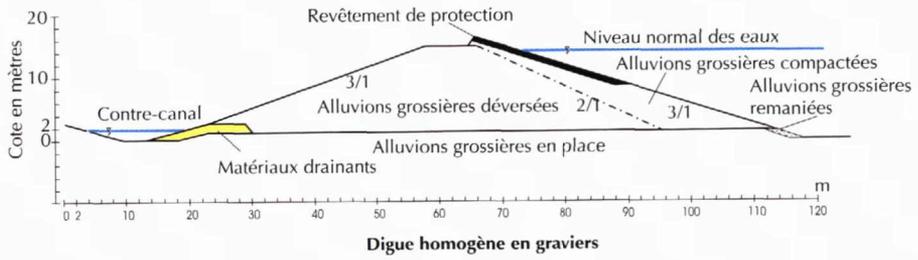
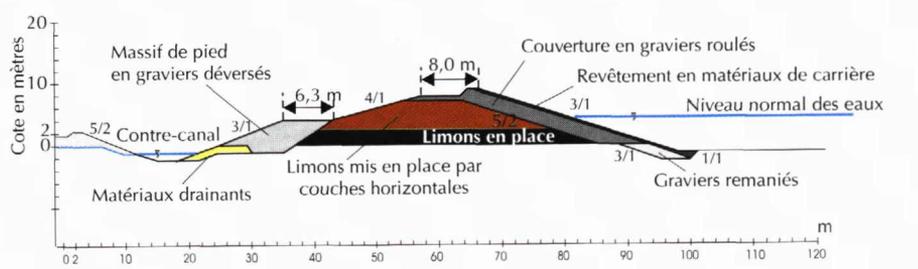


Figure 6 – Coupe type de confortement côté fleuve de la digue de Fondettes-Luynes – Projet DDE Indre-et-Loire (1997)



Digue homogène en graviers



Digue en graviers avec noyau en limons

Figure 7 – Coupe type de digue des aménagements hydroélectriques du Rhône (Mériaux *et al.*, 2001, d'après CNR)

Aujourd'hui, la conception de ce type d'ouvrage se rapproche de celle des petits barrages en terre ou des endiguements d'aménagement hydroélectrique (figure 7). Une étude de mécanique des sols doit être effectuée pour définir les caractéristiques mécaniques et d'étanchéité des matériaux. Selon les cas, il pourra être décidé de

zoner la digue en séparant les fonctions d'étanchéité et de stabilité mécanique. On sera, en particulier vigilant au problème du contrôle de l'évacuation des eaux d'infiltration dans la digue, ce qui pourra conduire à la mise en œuvre de matériaux drainants. Le lecteur pourra se reporter à la référence suivante (Degoutte, 1997) pour une présentation des règles de construction des petits barrages.

Nous n'insisterons pas davantage sur la conception des digues neuves, le présent guide s'attachant surtout aux digues existantes et à leur diagnostic.

c) MURS DE QUAI EN MAÇONNERIE OU EN BÉTON

Lorsque l'emprise de l'ouvrage est réduite – c'est particulièrement le cas lorsqu'un cours d'eau traverse une zone urbaine –, des digues de type « murs poids épais » sont édifiées. Elles sont en maçonnerie de pierres appareillées pour les plus anciennes, en béton pour les plus récentes. Elles sont éventuellement fondées sur pieux. Côté val, elles peuvent être épaulées par une recharge de matériaux en terre ou plus grossiers, parfois surmontées d'une voie de circulation.

d) DÉVERSOIRS

Les déversoirs (figure 8) sont mis en place pour entrer en fonctionnement lors des crues rares (typiquement de période de retour égale ou supérieure à cent ans). Leur cote est généralement inférieure de quelques décimètres (typiquement 1 mètre) à celle de la crête de digue. Ils permettent l'épandage de la pointe de crue dans une zone peu vulnérable comme un champ d'inondation, afin d'éviter ou de retarder la rupture de digue par surverse. Les déversoirs sont constitués de zones basses aménagées dans le profil longitudinal de la digue. Ils se présentent le plus souvent sous forme d'un seuil, prolongé en aval par un coursier puis par une fosse de dissipation, visant à contrôler et de dissiper l'énergie de chute. Le seuil en béton ou en maçonnerie est parfois surmonté d'une banquette, dont la cote est légèrement inférieure à celle de la crête de digue. Cette banquette fait office de fusible censé s'éroder rapidement dès le début de la surverse, pour retarder l'entrée en fonction du déversoir et permettre un meilleur écrêtement de la crue débordante.

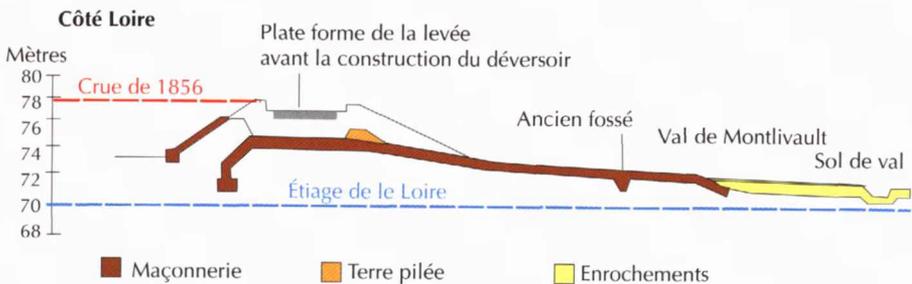


Figure 8 – Coupe type de déversoir sur la digue de Montiveaut (Loir-et-Cher) (1890) (Lino *et al.*, 2000)

e) OUVRAGES SINGULIERS

Il est habituel de rencontrer dans les digues un nombre significatif d'ouvrages singuliers, souvent traversants et plus ou moins faciles à repérer : conduites enter-

rées, galeries, aqueducs, réseaux divers (hydrauliques, électriques, téléphoniques...) traversants ou longitudinaux, regards, rampes d'accès, escaliers, parapets routiers, parfois même des caves et/ou des maisons comme, par exemple, dans certains vals de Loire.

2.2 Typologie des désordres et mécanismes de rupture

Dans la suite de ce guide, on s'intéresse essentiellement, sauf mention contraire, aux digues de type « en remblai ».

Les principaux mécanismes de rupture partielle ou totale (brèche) d'une digue sont :

- l'érosion de surface de la digue (crête ou talus côté val) en cas de surverse, conduisant très souvent à une brèche totale ;
- l'érosion côté fleuve due au courant, et en particulier l'érosion en pied de berge (ou affouillement) qui peut conduire à des glissements dangereux lorsque la digue est en bordure de cours d'eau ;
- l'érosion interne de la digue ou de sa fondation, conduisant aussi très souvent à une brèche totale, notamment si la crue est longue ;
- le glissement d'un des deux talus, et en particulier celui du talus côté rivière en cas de décrue rapide.

On peut aussi observer, mais plus rarement, des mécanismes de rupture par poussée de l'eau dans le cas de digues particulièrement étroites, ce qui peut survenir après glissement d'un des deux talus ou après une forte érosion du talus côté fleuve.

2.2.1 La surverse

La **surverse** (figure 9) correspond au débordement de l'eau au-dessus de la digue. Elle conduit rapidement à la brèche, souvent par une érosion s'amorçant en pied de talus côté val (s'il n'est pas noyé) et régressant jusqu'à la crête. C'est la principale cause identifiée dans les mécanismes de rupture de digues en remblai.

Il est admis que les digues ne supportent pas la surverse en l'absence de protection. En revanche, on sait que :

- des matériaux plus ou moins sableux et leur hétérogénéité sont des facteurs aggravants dans l'apparition de la brèche ;
- les irrégularités de l'ouvrage en crête ou sur le talus côté val (défauts de nivellement, tassements différentiels, mauvais terrassements) induisent une concentration locale des débits de surverse, favorable à l'accélération de l'érosion ;
- au contraire, un ouvrage bien compacté, avec un profil en long régulier, un talus à pente douce bien enherbé et une crête revêtue, supporterait une surverse de quelques centimètres pendant un temps limité.

On notera que la digue est submergée à partir d'une certaine intensité de crue (occurrence décennale, vingtennale, centennale...) dont la connaissance est très importante pour renseigner sur le niveau de protection assuré par l'ouvrage.

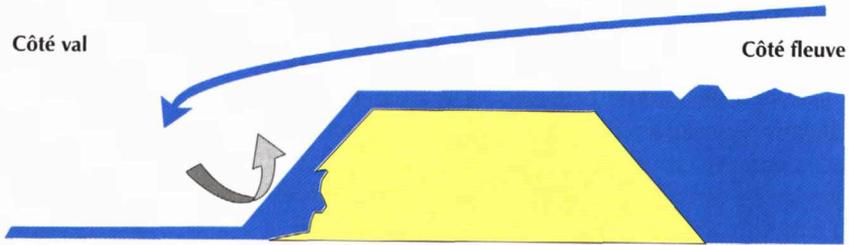


Figure 9 - Principe de la surverse

Ruptures en retour

C'est un cas particulier de la surverse qui se produit lorsque l'eau débordée revient dans le fleuve plus en aval et franchit à nouveau la digue. C'est aussi le cas lorsque le débit d'un bassin versant affluent sature ses exutoires vers le fleuve et remplit le val. L'apparition de la brèche est d'autant plus rapide que l'ouvrage a été imbibé longtemps, et le débit réintroduit dans le fleuve augmente d'autant plus la crue en aval.

2.2.2 Érosions externes et affouillements côté fleuve

Ce sont des mécanismes (figure 10) engendrés par les courants et/ou les vagues, en talus de digue, côté fleuve, ou bien sur les berges qui jouxtent les digues. Ils sont d'autant plus forts en crue et provoquent une érosion à la base du corps de levée. L'évolution de cette érosion affaiblit les caractéristiques mécaniques de l'ouvrage (augmentation de la pente ou création de surplombs). Elle peut mener à des glissements de matériaux, qui à leur tour favoriseront des phénomènes tourbillonnaires et érosifs allant jusqu'à l'ouverture plus ou moins rapide d'une brèche.

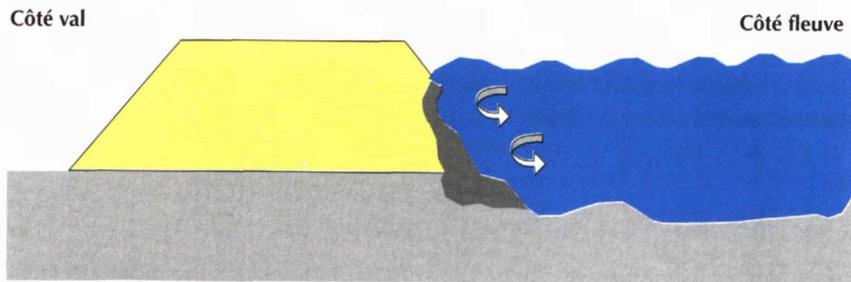


Figure 10 - Principe de l'érosion externe et des affouillements

2.2.3 Érosion interne (ou renard hydraulique)

Lors d'une crue, une charge hydraulique apparaît et engendre un gradient hydraulique dans le corps de la digue et sa fondation. Lorsqu'il atteint une valeur critique variable selon la nature des matériaux, des zones de circulation préférentielle de l'eau se créent et des phénomènes d'érosion interne apparaissent. Ils peuvent déboucher sur la création d'une galerie à travers l'ouvrage (renard), puis d'une brèche. En surface, l'érosion interne peut se révéler par l'apparition de fontis.

Les facteurs aggravants (figure 11) de ces phénomènes sont :

1. la présence de galeries ou d'excavations dans le corps ou la fondation de l'ouvrage (terriers d'animaux fouisseurs, conduits racinaires d'arbres morts, constructions dans le corps de digue) ;
2. la mauvaise étanchéité entre le corps de digue et les hétérogénéités (constructions, conduits, galeries) qui s'y trouvent ;

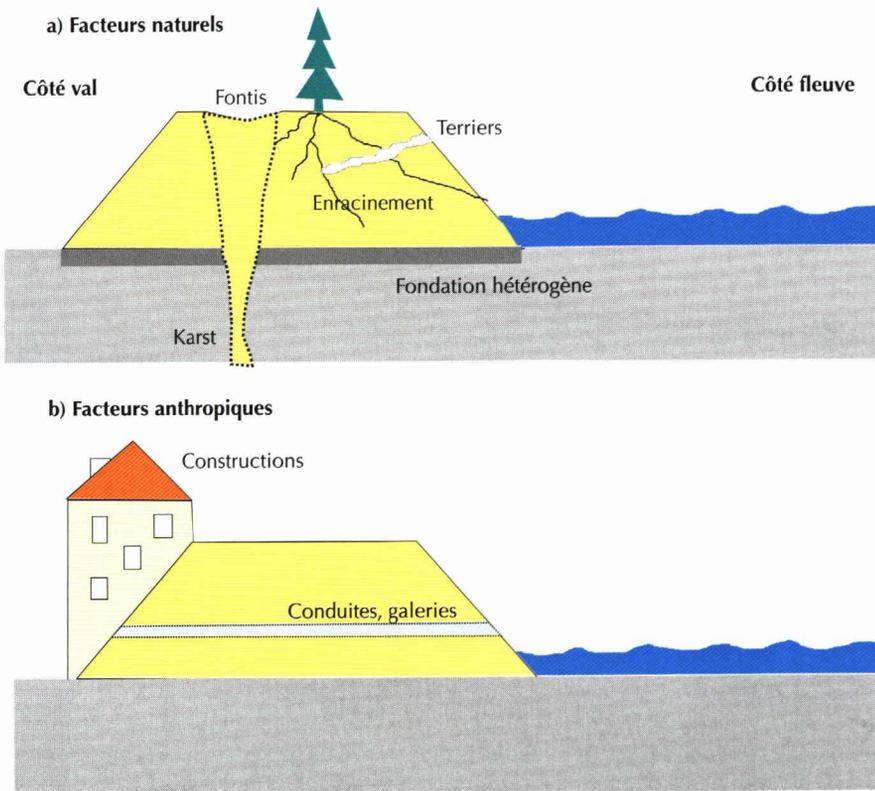


Figure 11 – Facteurs naturels (a) et anthropiques (b) aggravant l'érosion interne

3. la présence d'hétérogénéités dans les couches de matériaux constitutifs du remblai et plus particulièrement de la fondation, qui a rarement fait l'objet d'un traitement adéquat ;

4. la perméabilité relative du corps de digue dans son ensemble. Plus les matériaux de la digue sont perméables, plus son profil doit être large (plus le rapport largeur/hauteur doit être grand) pour éviter le risque d'érosion interne.

Enfin, plus rarement, des fontis apparaissent sur la surface de la digue (figure 11) ou en son pied, résultant de circulations d'eau et d'effondrements dans une fondation comportant un niveau karstique.

2.2.4 Glissement de talus

Le risque de glissement du talus côté val apparaît lorsque la digue est saturée (crue suffisamment longue). S'il se produit lorsqu'elle est en charge, le glissement de talus côté val peut engendrer plus ou moins rapidement la rupture de la digue elle-même (brèche) avec des conséquences graves. Trois facteurs peuvent favoriser l'apparition de ce phénomène :

- pentes de talus forte (pentes supérieures à 2/3 ou fruits inférieurs à 3H/2V) ;
- piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et à la présence de couches hétérogènes ;
- faibles caractéristiques mécaniques des matériaux de remblai (faible compacité), ou présence d'une couche argileuse sous-consolidée au niveau de la fondation.

On notera que ces trois facteurs peuvent potentiellement être réunis dans les zones d'anciennes brèches.

À la décrue, lorsque celle-ci est rapide, le talus de la digue ou son revêtement peut aussi glisser côté rivière. Ce phénomène, plus fréquent que le précédent, se produit sur les talus de digues dont la pente est raide et/ou constitués de matériaux argileux ou revêtus d'un perré étanche. Il est lié à l'état de saturation du talus et/ou au développement de sous-pressions sous le perré, alors que la charge hydraulique a disparu côté cours d'eau et n'exerce plus son action stabilisatrice. Les glissements sont facilités si les talus ont été érodés (et raidis) par les courants du cours d'eau en crue.

Cas particulier des digues ou éléments de digue en maçonnerie ou en béton

Fréquents en zone urbaine, ces ouvrages sont constitués en pierres de maçonnerie ou en béton armé. Dans la grande majorité des cas, ils ont également – voire surtout – une fonction de soutènement et de protection de la berge (on parle souvent de murs de quai). Leur instabilité engendre des ruptures généralement brutales et résulte souvent de phénomènes d'affouillement associés à un défaut de conception (par exemple, sous-dimensionnement de la protection parafouille) et/ou du vieillissement des composants (par exemple, dégradation des joints en parement ou pourrissement des pieux de bois).

Les outils à haut rendement adaptés au diagnostic de ces ouvrages et risques particuliers sont aujourd'hui encore en cours de développement. On citera l'exemple intéressant d'une étude de diagnostic approfondi ayant été réalisée en 2002-2003 sur les murs de quai du Rhône dans sa traversée de la ville d'Arles, sous la maîtrise d'ouvrage du SYMADREM (syndicat mixte d'aménagement des digues du Rhône et de la mer).

2.3 Diagnostic d'un ouvrage

2.3.1 Définition du diagnostic

Par définition, le diagnostic d'un ouvrage de génie civil consiste à :

- déterminer le niveau de sécurité de l'ouvrage, relever ses points de faiblesse, ses défauts et ses dysfonctionnements ;
- définir judicieusement les travaux qui permettent de remédier aux insuffisances constatées.

2.3.2 Particularités du diagnostic des digues

Les cours d'eau du territoire national comporteraient près de 10 000 km de digues. Ce sont des ouvrages à grand linéaire, dont les plans de construction sont souvent perdus ou inexistant, et dont l'entretien est en général abandonné. Le diagnostic est donc *a priori* coûteux, ne serait-ce que du fait du grand linéaire concerné. Il est de plus délicat, car il faut déterminer les points de faiblesse d'un ouvrage qui est rarement soumis aux sollicitations hydrauliques et mécaniques pour lesquelles il est censé être conçu.

Comme pour les barrages (Degoutte, 1992), le diagnostic des digues est alors réalisé suivant deux étapes :

- un diagnostic rapide basé sur un débroussaillage préalable, un levé topographique de l'ouvrage et de ses abords puis une inspection visuelle. Menés régulièrement, l'entretien de la végétation et les inspections visuelles permettent, en outre, d'assurer la surveillance de routine de la digue ;
- un diagnostic approfondi, qui reprend toutes les phases décrites dans la troisième partie de ce guide.

Le phasage en deux étapes a pour objectifs :

- d'encourager et de programmer la mise en œuvre minimale de la première étape ; elle permet de déterminer rapidement l'état de l'ouvrage et les zones à risques (pré-zonage) ;
- d'envisager, à la suite du diagnostic rapide, un diagnostic approfondi, qui peut se limiter aux zones à risques déterminées lors de la première étape.

3

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE POUR LE DIAGNOSTIC À GRAND RENDEMENT DES DIGUES À SEC



3.1 Introduction

Afin de prévenir les ruptures de digues et leurs conséquences, la démarche qu'il convient d'adopter repose sur trois éléments : **la surveillance, l'entretien et le diagnostic des ouvrages**. Les deux premiers points sont présentés dans un récent guide sur les digues de protection contre les inondations (Mériaux *et al.*, éd. 2004). Le troisième point a fait l'objet d'un ouvrage un peu plus ancien (Lino *et al.*, 2000) qui proposait des idées d'association des méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues. Le retour d'expérience relatif à ces méthodes – notamment géophysiques – est aujourd'hui beaucoup plus riche et s'appuie en particulier sur les nombreux résultats des expérimentations conduites dans le cadre du projet national CriTerre (digues du Cher et de l'Agly). Dans un tel contexte, l'objectif de ce guide est de décrire et de hiérarchiser ces méthodes géophysiques et géotechniques en fonction de leur aptitude à répondre à la problématique du diagnostic à grand rendement que posent les milliers de kilomètres de digues répartis le long des cours d'eau du territoire national.

Le **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**.

3.2 Phases d'études préalables : la recherche d'indices

De manière générale, toute étude concernant un ouvrage de génie civil, maritime ou fluvial, doit débiter par une recherche d'indices. Cette phase est absolument nécessaire dans le cadre du diagnostic des digues. Elle consiste à recueillir le plus d'informations possible concernant l'histoire de la digue, ses caractéristiques extérieures (topographie) et le système dans lequel elle s'intègre (géologie locale et dynamique du cours d'eau). Cette étude préalable doit notamment 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. Elle est la condition initiale nécessaire aux études géophysiques et géotechniques des phases suivantes.

3.2.1 Recherche historique

La **recherche historique** est un point essentiel dans l'élaboration du diagnostic des digues. À titre d'exemple, citons une étude (Halbecq, 1996), basée sur une recherche approfondie d'archives, qui a porté sur 400 km de levées de la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Montjean. Elle s'intéresse aux trois crues du XIX^e siècle (1846, 1856 et 1866), répertorie les ruptures de digues et propose une analyse des causes d'endommagement. Il apparaît ainsi :

- qu'environ la moitié des brèches survenues lors de ces trois crues sont dues à des phénomènes de surverse, et qu'environ un tiers d'entre elles sont apparues plus d'une fois au même endroit, ou à proximité ;
- que la morphologie (orientation et dimensions) du système digue/cours d'eau doit être particulièrement étudiée. En effet, dans 30 % des cas, des phénomènes hydrauliques résultant d'une orientation perpendiculaire de la digue par rapport à l'écoulement principal, ou de la concavité de la rive dans une courbe du cours d'eau, ont été suffisamment perturbateurs pour engendrer une rupture. De plus, le rétrécissement de la largeur entre levées, ainsi que l'implantation de la levée directement au bord du lit, sont d'autres facteurs de rupture.

Cette étude a montré la richesse des renseignements qu'une recherche historique peut apporter. Bien sûr, dans le cadre d'une étude particulière, le temps alloué à cette étape est bien souvent restreint. Mais il faut, autant que possible, tenter de préciser les quatre points suivants pour l'élaboration du diagnostic :

- **prendre connaissance des données disponibles**, tout d'abord auprès du gestionnaire de l'ouvrage mais aussi auprès d'organismes publics spécialisés dans l'étude d'ouvrages hydrauliques (Cemagref, CETMEF...), auprès d'organismes universitaires et

professionnels (bureaux d'études, laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées) qui ont déjà réalisé des travaux sur les levées concernées. Par ailleurs, d'autres renseignements peuvent être obtenus par une enquête de voisinage. Tout autre document concernant les digues (les cartes anciennes, les cartes IGN, les plans et les photos aériennes) doit être recherché ;

– **localiser les brèches historiques** : les collectivités locales, comme les communes et les départements où sont implantées les digues, possèdent généralement des archives historiques sur les crues et les endommagements qu'elles ont provoqués. Sur le site expérimental CriTerre de la levée rive droite du Cher à Savonnières, la brèche historique de 1856, mentionnée dans les archives et repérable sur le terrain par la présence d'un étang côté val, a été parfaitement soulignée par les résultats des mesures électromagnétiques de 1999 ;

– **recenser et localiser les repères de crues historiques** ;

– **rechercher les zones de prélèvement de matériaux qui ont servi à la construction et/ou au comblement des brèches**, et ce pour deux raisons. D'une part, cela permet de déterminer quelle est la nature des matériaux constituant la digue. D'autre part, les matériaux étaient souvent extraits aux abords de la digue, créant ainsi de nouvelles zones de faiblesse dont la localisation est d'importance capitale.

3.2.2 Étude géologique

Elle doit permettre d'identifier les matériaux environnants qui, souvent, entrent dans la constitution de la digue : les digues anciennes ont, en effet, été construites pour la plupart à partir d'une extraction locale des matériaux (terrassements en déblai-remblai). L'étude géologique doit aussi permettre de déterminer la nature des terrains sur lesquels la digue est construite : le substratum rocheux (par exemple les karsts), surtout s'il est peu profond, peut jouer un rôle important sur la digue et son environnement. Elle consiste principalement à décrire la disposition et les caractéristiques des formations géologiques. La nature des terrains rencontrés sur le territoire national est bien étudiée et répertoriée par des organismes officiels comme le Bureau de recherche géologique et minière. Ces données sont régulièrement mises à jour, publiées sur des cartes géologiques (cartes géologiques de la France à 1/50 000^e, soit 1 064 feuilles, et banque de données du sous-sol).

En génie civil, les données géologiques traditionnelles nécessitent d'être complétées. D'une part, la zone étudiée, généralement la proche surface, peut différer localement de la zone géologique particulière qui est décrite par la carte. D'autre part, l'évolution des terrains, que ce soit de manière naturelle (par exemple, le ruissellement de l'eau) ou anthropique (par exemple, l'exploitation de carrières), peut avoir engendré une modification importante de la structure du sol. L'étude géologique apparaît donc être la condition nécessaire et préalable à toutes études et travaux envisagés sur le terrain.

3.2.3 Analyse morphodynamique

La morphologie du système digue/cours d'eau évolue au cours du temps. Ainsi, des zones de levée jusqu'ici peu exposées peuvent se retrouver sollicitées par de nouveaux aléas liés à la rivière. Par exemple, l'apparition d'un îlot sableux dans le lit du cours d'eau reporte les courants sur les berges. L'analyse morphodynamique consiste alors à identifier et à caractériser les évolutions passées et futures du chenal. À ce titre, il faut pouvoir préciser les points suivants (Lino *et al.*, 2000) :

- pour ce qui concerne les rivières à méandres : la translation des méandres et les possibilités de coupure naturelle de méandre ;
- pour ce qui concerne les rivières en tresse (essentiellement) : la progression latérale des îlots ;
- pour ce qui concerne toutes les rivières (à méandres, en tresse, torrentielles) : l'enfoncement du lit par érosion régressive ou progressive, les points durs du profil et les ruptures de pentes.

La connaissance des cartes ou des photos aériennes à des périodes successives est un atout précieux pour cette étude morphodynamique.

La zone à étudier comprend un secteur de plusieurs kilomètres encadrant la digue étudiée, le lit endigué et les zones côté val et côté fleuve de la digue. L'analyse théorique nécessite des connaissances sur la sédimentologie, sur l'hydrologie et sur les caractéristiques morphométriques du cours d'eau.

3.2.4 Topographie – Données de repérage (Lino *et al.*, 2000)

La topographie a pour objectifs :

- d'établir le profil en long de la crête de digue et de le comparer aux lignes d'eau en crue, afin d'évaluer les risques de surverse en crue ;
- de préciser les profils en travers de la digue pour les études géotechniques (stabilité, risque de renard), de localiser en plan et en cote des ouvrages ou parties d'ouvrages singuliers (portes, cales, regards, batardeaux, vannes, entonnement d'ouvrages de traversées, etc.) ;
- de fournir un outil de gestion et de maintenance de la digue : support de l'inspection visuelle, base de repérage des sondages géotechniques et géophysiques en plan et en profondeur et des éléments de suivi de la digue.

a) PROFIL EN LONG

La hauteur de la digue est en partie définie pour éviter la surverse (cause majeure de rupture). Ce niveau est fonction de celui de la crue de référence, laquelle constitue bien une donnée essentielle pour le dimensionnement de ces ouvrages. Il est important que la hauteur de digue et le niveau de référence, ainsi que les points kilométriques (PK) soient bien rattachés au même référentiel de position : référentiel NGF pour ce qui concerne les cotes, référentiel PK-digue préexistant ou créé pour l'étude (à défaut, PK route ou PK rivière) pour le repérage linéaire.

Le profil en long est établi, avec un pas de 20 à 25 m, sur la plate-forme de couronnement de la digue, voire moins localement si la crête est irrégulière. Il est en effet capital de repérer les points bas, souvent à l'origine de rupture par surverse.

Un second profil sur le sommet de la rehausse (ou banquette), si elle existe, peut être réalisé pour déterminer la revanche disponible par rapport à la crue de référence et pour mettre en évidence les sections où cette revanche est insuffisante.

b) PROFIL EN TRAVERS

La connaissance du profil en travers de la digue est une donnée de base pour caractériser l'ouvrage et étudier d'éventuels confortements. Elle est aussi essentielle pour apprécier le risque d'instabilité lors d'une crue, où la charge hydraulique sur la digue peut atteindre 4 à 5 m de hauteur. Ce risque de rupture relève de trois phénomènes :

- l'érosion interne de la digue ou de sa fondation (création de renard hydraulique) ;
- l'instabilité du talus côté val pendant la crue ;
- l'instabilité du talus côté fleuve à la décrue.

Les profils en travers sont réalisés tous les 100 à 200 m sur des zones homogènes, et tous les 50 à 100 m sur des zones complexes. Ces profils doivent comporter au minimum entre 8 et 12 points – et plus si des ouvrages singuliers sont présents sur la digue – et inclure une bande d'une dizaine de mètres de chaque côté de la digue, côté fleuve et côté val.

c) PLAN TOPOGRAPHIQUE

C'est une étape essentielle pour la qualité du diagnostic proposé. L'établissement d'un plan topographique au 1/500^e ou au 1/1000^e est l'outil de base pour le suivi et la maintenance des levées. Il constitue le support de travail sur lequel seront reportées précisément les informations et les observations recueillies sur la digue lors de l'inspection visuelle et lors des reconnaissances géophysiques et géotechniques.

Généralement, ce plan est rattaché à un système courant de références (coordonnées Lambert par exemple). Cela permet aux résultats d'être intégrés facilement dans des systèmes d'informations géographiques (SIG) et autres logiciels de traitement des données.

3.2.5 Inspection visuelle (Lino *et al.*, 2000)

L'inspection visuelle consiste à répertorier toutes les caractéristiques morphologiques externes de la digue et tous les indices révélant ou suspectant un désordre : les mouvements de terrain, les zones d'érosion, les ravinements, une végétation particulière, les terriers d'animaux, les canalisations... Pour réaliser cette étape, il faut parcourir intégralement à pied la portion de digue étudiée, sur chacune de ses parties (crête, talus côté val et côté fleuve, pied de talus). Dans le cas où les levées sont bordées par le fleuve, une inspection en barque ainsi qu'une inspection subaquatique peuvent s'avérer nécessaires.

Cette phase sera réalisée après la recherche historique et après le levé topographique de précision. Ces premières étapes préciseront la méthode utilisée pour l'inspection visuelle : référence kilométrique, repérage sur le terrain, longueur des sections élémentaires de description... L'inspection visuelle permet de valider ou d'infirmer les informations recueillies au cours de ces étapes préalables, et de les localiser précisément sur une carte.

Par ailleurs, elle doit se réaliser dans des conditions optimales d'observation. Ainsi, l'inspection visuelle doit être effectuée si possible hors période végétative. Dans tous les cas, on veillera si possible à ce que les zones inspectées soient débroussaillées au préalable.

En termes de moyens, trois personnes compétentes en génie civil/géotechnique doivent être associées à l'inspection visuelle.

a) POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Tout d'abord, l'inspection visuelle doit permettre de vérifier et de compléter les informations recueillies lors de la recherche historique. D'autre part, les niveaux d'eau sont relevés de part et d'autre de la levée le jour de la visite. Enfin, si la digue est équipée d'appareils de surveillance (piézomètres), il convient d'en relever les mesures.

b) INDICES DE DÉSORDRE

– talus côté val

- végétation (nature, développement, racines et souches),
- amorces de glissement, ravinements,
- terriers (taille, densité),
- débouchés de canalisations et ouvrages singuliers,
- indices de fuite, zones humides et points d'eau,
- existence, nature et état du confortement aval et/ou du revêtement de protection,
- singularités topographiques au-delà du pied de talus (indice d'ancienne brèche, dépression, fontis, fossé, canal) ;

– crête

- végétation (nature, développement, racines et souches),
- nature et caractère praticable de la voie de crête (route, chemin),
- fissures longitudinales et transversales,
- tassements, fontis,
- terriers (taille, densité),
- existence, nature et état du dispositif de rehausse,
- existence, nature et état du revêtement,
- ouvrages singuliers ;

– talus côté fleuve

- végétation (nature, développement, racines et souches),
- amorces de glissement ou d'érosion, ravinements, fontis,
- terriers (taille, densité),
- débouchés de canalisations et ouvrages singuliers,
- zones humides, points d'eau et laisses de crue,

- existence, nature et état du revêtement de protection,
- existence, nature et état de la protection de pied de talus,
- singularités topographiques au-delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis).

Par ailleurs, la présence de constructions (regards, stations de pompage, maisons...) à proximité ou incorporées dans le corps de digue peut constituer des zones de faiblesse qu'il est capital de répertorier et de situer précisément sur la carte d'étude. À cette occasion, l'enquête de voisinage est réalisée si elle n'a pu être conduite auparavant.

L'ensemble des informations recueillies lors de l'inspection visuelle est répertoriée sur les cartes topographiques au 1/500^e ou au 1/1000^e disponibles. Les désordres constatés sont reportés sur la carte et numérotés. Ces numéros renvoient aux lignes successives des fiches de relevé des désordres où ils sont détaillés et commentés. Les profils en travers sont répertoriés généralement au dos des fiches et sont dessinés au niveau du point kilométrique (PK) concerné.

À ce descriptif des désordres est généralement associé un dossier photographique constitué d'une (de) prise(s) de vue de l'ensemble de l'ouvrage, et des photographies de chaque désordre, référencées par le numéro du désordre correspondant.

3.3 La reconnaissance géophysique

3.3.1 Principe et objectif de la reconnaissance géophysique

La reconnaissance géophysique sur une digue consiste à déduire les caractéristiques internes de l'ouvrage en étudiant les variations d'un champ physique mesuré selon des profils en travers ou le long (en crête ou en pied) de la digue (figure 12).

Le résultat d'une reconnaissance géophysique doit permettre de donner une image interne de l'ouvrage sur tout le linéaire, reflétant la nature et la répartition des matériaux, les zones remaniées, la présence d'hétérogénéités, de conduites, de réseaux enterrés...

L'analyse des résultats doit mener au final à un zonage de l'ouvrage, c'est-à-dire à la détermination de tranches plus ou moins hétérogènes susceptibles d'évoluer défavorablement lorsque la digue est en charge. Les hypothèses résultant de la reconnaissance géophysique doivent être corrélées :

- en amont, avec les résultats de la phase d'études préalable ;
- en aval, avec les résultats des sondages, qui peuvent être implantés plus judicieusement, là où les mesures géophysiques traduisent un changement de constitution dans le corps de l'ouvrage.

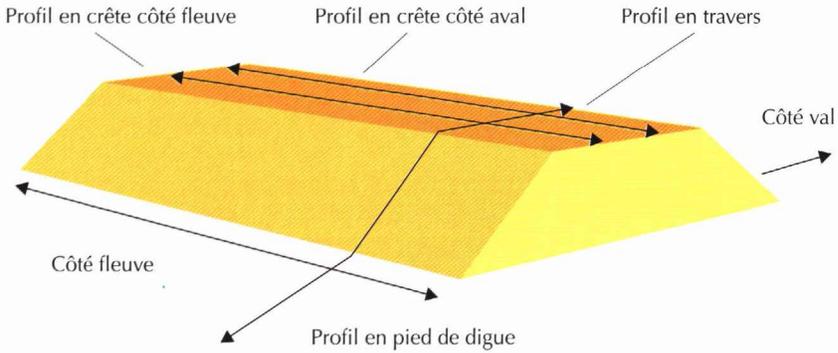


Figure 12 – Positionnement des profils sur une digue

3.3.2 Quelles grandeurs physiques faut-il mesurer pour le diagnostic des digues ?

Les digues sont des ouvrages de grande longueur. Le besoin d'établir un diagnostic sur plusieurs kilomètres exige, dans une première étape, l'utilisation de **méthodes à grand rendement** qui renseignent sur les caractéristiques **de l'ensemble du corps de l'ouvrage** jusqu'à son sol support.

Ainsi, la profondeur d'investigation à atteindre est généralement de l'ordre de 8 à 12 m. Elle englobe la hauteur moyenne d'une digue et une partie de son assise. Par ailleurs, les matériaux des digues comportent généralement une quantité importante de limon ou d'argile. Ce sont des matériaux électriquement conducteurs, c'est-à-dire que leurs constituants permettent à un courant continu ou basse fréquence respectivement de circuler ou de se diffuser. La grandeur physique qui permet de mesurer ces phénomènes est la conductivité σ (mesurée en $S.m^{-1}$) des matériaux. En géophysique, on étudie la grandeur inverse qui est la **résistivité ρ (mesurée en $\Omega.m$)**. C'est la grandeur qui est prioritairement retenue pour le diagnostic des digues. Les méthodes permettant de mesurer la résistivité d'un matériau sont les **méthodes électromagnétiques basse fréquence et les méthodes électriques**.

La résistivité des matériaux dépend essentiellement des phénomènes de conduction électrolytique et, d'une manière moindre, de conduction électronique. Les valeurs des résistivités dépendent de la nature du matériau et couvrent un large domaine. La valeur de la résistivité d'un matériau dépend aussi de la teneur en eau, de la porosité du milieu, du mode de communication entre les vides (la tortuosité) et de la salinité de l'eau. La loi empirique d'Archie synthétise ces propriétés :

$$\rho = a \rho_e \Phi^{-m} S^{-n}$$

où ρ et ρ_e sont respectivement les résistivités du matériau et de l'eau contenue dans les pores, Φ est la porosité, S la fraction volumique de pores contenant de l'eau, a , m , et n sont des constantes telles que : $0,5 \leq a \leq 2,5$, $1,3 \leq m \leq 2,5$ et $n \approx 2$.

L'ordre de grandeur de la résistivité (et inversement de la conductivité) des principaux composants des sols est représenté sur la figure 13 et dans le tableau 1.

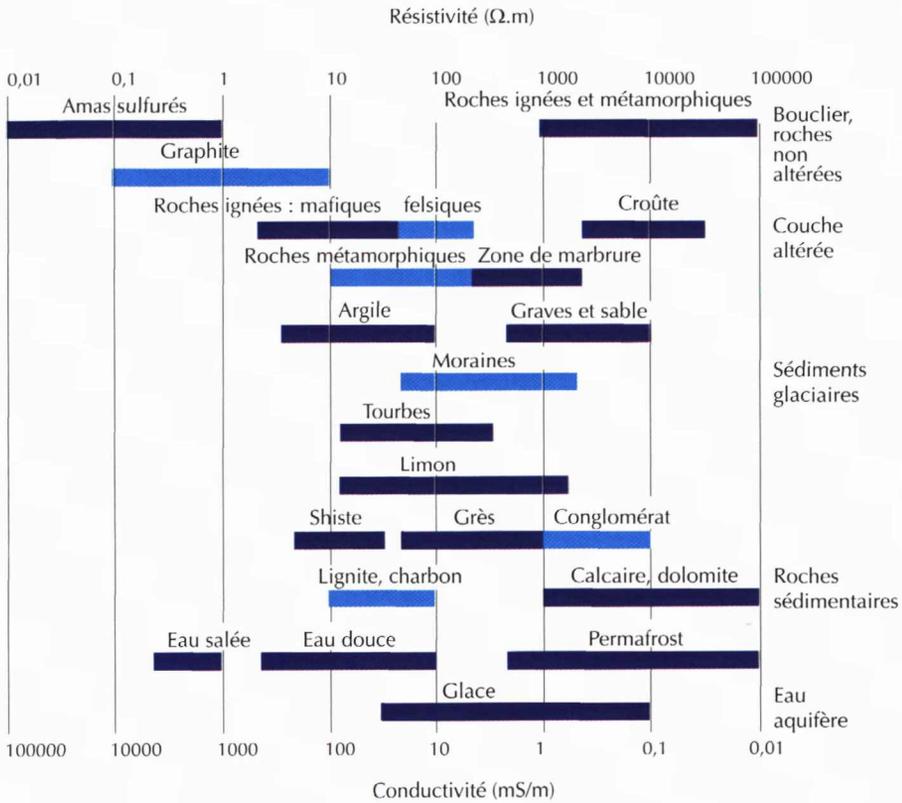


Figure 13 – Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Palacky, 1991)

D'autres grandeurs physiques peuvent être exploitées :

- la **permittivité complexe** des sols, qui rend compte à la fois des phénomènes de conduction et des phénomènes de polarisation, est accessible par l'utilisation de radars, méthodes électromagnétiques haute fréquence (> 100 MHz). En général, seuls les deux premiers mètres du corps de digue (exceptionnellement jusqu'à 5 m) sont investigués par ces méthodes, car les ondes radar se propagent difficilement dans les milieux conducteurs qui constituent la majorité des digues rencontrées sur le territoire national ;

- l'**impédance mécanique** des matériaux, que l'on mesure avec les méthodes sismiques, permet de délimiter des horizons réflecteurs dans l'ouvrage, en particulier l'interface entre la fondation meuble et le *substratum*. La mesure de ces grandeurs peut venir en complément des mesures de résistivité.

Matériau	Résistivité ($\Omega.m$)	Matériau	Résistivité ($\Omega.m$)
Prés, herbage	10-50	Grès marneux ou argileux	15-120
Champ, verger	50-100	Grès fissurés	1000-1500
Terre en friche, forêt	100-1000	Grès compacts	2000-5000
Graviers humides	1000-5000	Marnes	0,5-60
Sables secs	500-10000	Argiles molles, vases	0,5-30
Sables humides	100-350	Argiles	1-100
Limons secs	400-2000	Schistes compacts	2000-3000
Limons humides	20-200	Schistes altérés	30-200
Tourbes	20-700		
Craies	100-300	Eau douce	100-10000
Calcaires francs	300-5000	Eau de rivière	20-60
Calcaire marneux	80-300	Eau de mer	0,1-0,5

Tableau 1 – Ordre de grandeur des résistivités de quelques matériaux (Hollier-Larousse, 2000)

3.3.3 Méthodes géophysiques privilégiées pour le diagnostic des digues

a) RECONNAISSANCE À GRAND RENDEMENT, À PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION OPTIMALE POUR LES DIGUES CARROSSABLES EN CRÊTE

Ce sont là les méthodes que l'on peut appliquer prioritairement sur les digues carrossables, c'est-à-dire les digues sur lesquelles un véhicule peut circuler. **Les méthodes de reconnaissance géophysique à grand rendement et à profondeur de pénétration optimale pour le diagnostic des digues à sec sont les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain et en champ proche.**

Les **méthodes en champ proche** sont des méthodes dont la source, une boucle de courant, est située à une distance fixe du récepteur, une autre boucle de courant. Elles sont appelées méthodes à deux boucles, ou plus souvent, **méthodes Slingram**. Elles permettent de mesurer la conductivité apparente (l'inverse de la résistivité apparente) des matériaux du corps de digue et de son sol support. Ces méthodes peuvent mettre en évidence des hétérogénéités sur une gamme moins large de

résistivité : elles sont plus sensibles à la présence de matériaux conducteurs que résistants.

Les **méthodes dites « en champ lointain »** utilisent les émetteurs civils et militaires couvrant la bande VLF (Very Low Frequency (3 kHz-30 kHz)), la bande LF, la bande MF jusqu'à 1 MHz environ. Ces émetteurs sont généralement situés de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres du point de mesure. Elles permettent de mettre en évidence des hétérogénéités sur une gamme large de résistivité : elles sont sensibles à la fois à la présence de matériaux conducteurs et résistants. Dans le cadre du projet national CriTerre, la méthode testée est la **Radio magnétotellurique (Radio-MT)**.

Deux dispositifs de mesure, un pour chaque méthode, ont été testés sur digues. Ils présentent toutes les qualités requises pour une auscultation à grand rendement, sur de grands linéaires et avec une profondeur de pénétration optimale, c'est-à-dire avec un rayon d'investigation permettant une observation de la résistivité des matériaux de la crête jusqu'à la base de la digue.

b) RECONNAISSANCE SUR DE GRANDS LINÉAIRES, À PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION OPTIMALE, À MOINDRE RENDEMENT POUR LES DIGUES NON CARROSSABLES EN CRÊTE

Lorsque l'ouvrage n'est pas carrossable en crête, le rendement est moins grand : il est généralement inférieur à la vitesse de marche de l'opérateur. Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain s'appliquent toujours. Cependant, elles n'ont pas été testées en mode pédestre dans le cadre de ce projet. (Busch, 2007)

En revanche, les méthodes Slingram ont été déployées en crête et en pied de digue avec de très bons résultats.

c) RECONNAISSANCE LOCALE À PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION OPTIMALE

Lorsque l'ensemble de l'ouvrage a été ausculté (plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres), un premier zonage des portions hétérogènes est réalisé. Il permet de délimiter des sections métriques à décamétriques, sur lesquelles les mesures géophysiques vont être conduites avec plus de précision. Cette phase peut aussi intervenir après certaines reconnaissances géotechniques. **L'application d'une méthode géophysique locale** (c'est-à-dire dont le rendement est faible mais dont les résultats obtenus sont plus précis que les méthodes à grand rendement) apparaît aujourd'hui comme **une étape nécessaire au diagnostic**.

Les méthodes à grand et moyen rendements sont toujours utilisables. Il suffit alors d'adapter le pas de mesure, en général de l'ordre du mètre, à la zone d'étude. Néanmoins, les méthodes électromagnétiques basse fréquence sont limitées pour localiser les hétérogénéités en profondeur et pour imager précisément la répartition des résistivités dans l'ouvrage.

Les **méthodes électriques (panneau) en courant continu** sont, en revanche, très utiles pour étudier la géométrie de la digue, sa stratification et la distribution de ses hétérogénéités. Leur principe repose sur l'injection d'un courant continu et sur la mesure du potentiel à travers des électrodes plantées dans le sol. Ces méthodes sont plus longues à mettre en œuvre, mais très riches d'informations, et couvrent aisément

la hauteur de digue à ausculter. Leur déploiement peut se faire consécutivement aux méthodes à grand rendement, ou bien après des essais géotechniques, sur le même emplacement, afin d'optimiser les corrélations possibles entre les données géophysiques et géotechniques.

La **sismique réfraction** peut être envisagée pour déterminer les horizons réflecteurs et les zones hétérogènes. Le déploiement de ces méthodes pour l'auscultation des digues reste plus coûteux, mais leur utilisation a montré son intérêt pour étudier le contact entre la fondation meuble de la digue et le *substratum*.

d) RECONNAISSANCE À MOINDRE EFFICACITÉ : AUTRES MÉTHODES

Le **radar géologique** est un instrument de mesure qui peut être utilisé à grand rendement sur de grands linéaires. Sur les digues, il peut être envisagé avec la réserve suivante : la profondeur de pénétration est limitée dans les milieux conducteurs et ne permet pas une auscultation sur la plupart des corps de digue rencontrés, majoritairement composés de matériaux conducteurs. La profondeur d'investigation ne dépasse généralement pas 2 m. Cependant, si la constitution de la digue et sa hauteur permettent d'envisager l'application de cette méthode, elle sera peu coûteuse, à grand rendement et riche de renseignements.

Les **méthodes électriques à grand rendement** (à électrodes capacitives), utilisables en digue carrossable, ont été suggérées et utilisées, mais leur profondeur d'investigation était limitée (environ 2 m). D'autres types de dispositifs mériteraient cependant d'être testés.

Les **méthodes sismiques réflexion haute résolution et en onde surface, munies de capteurs de type « gimble »**, ont été suggérées, mais il reste à déterminer quel serait leur rendement comparé à celui des méthodes électromagnétiques basse fréquence, et quelles informations complémentaires cette méthode pourrait-elle apporter.

Les **méthodes infrarouges** mettent en évidence des contrastes de température de surface. Elles permettent de détecter des zones de suintement ou de résurgence côté val, ou des zones privilégiées d'alimentation du fossé de drainage, s'il existe.

Les **méthodes de polarisation spontanée** sont également déployées pour détecter des circulations d'eau à travers un ouvrage en charge. Elles ne font pas partie des méthodes présentées dans ce guide, qui s'attache plus particulièrement à décrire les méthodes applicables sur les digues à sec. Elles seront, en revanche, à retenir dans le cadre d'une étude méthodologique pour le diagnostic des digues en situation *post* crue.

en charge, voire ...

3.4 La reconnaissance géotechnique

3.4.1 Principe et objectif de la reconnaissance géotechnique

La notion de rendement optimal pour la reconnaissance géotechnique implique la possibilité d'effectuer des essais de caractérisation des sols *in situ* et/ou de prélever

des échantillons de matériaux dans l'ouvrage, afin d'en tirer des informations précises. Ils sont réalisés avec un pas approprié le long de la levée, pas qu'il est intéressant d'adapter par tronçons successifs de digue en fonction des résultats des reconnaissances géophysiques. **Ils comprennent essentiellement des forages destructifs ou carottés, des essais pénétrométriques, de perméabilité et de cisaillement, et éventuellement des sondages à la pelle mécanique.**

L'objectif de la campagne de reconnaissance géotechnique est de caractériser ponctuellement les défauts de perméabilité et/ou de compacité, et les contacts entre les différentes couches. Ces données doivent, en outre, servir d'étalonnage aux résultats des mesures géophysiques. Elles permettent ainsi d'enrichir l'interprétation des données recueillies et d'affiner le modèle géophysique et géotechnique de l'ouvrage. Elles peuvent aussi donner lieu à des nouvelles investigations géophysiques locales, comme le panneau électrique ou la sismique réfraction.

3.4.2 Méthodes géotechniques privilégiées pour le diagnostic des digues

Les **essais pénétrométriques** sont aisés et rapides à mettre en œuvre. Ils apportent une information immédiate sur les positions des interfaces entre couches, et donnent une approche qualitative des caractéristiques mécaniques des sols.

Les **sondages à la pelle mécanique** permettent de reconnaître la nature et la succession des couches de matériaux, sur une tranche de hauteur variable du corps de digue. Ils permettent également la collecte d'échantillons de sol remanié pour caractérisation en laboratoire de mécanique des sols.

Les **essais de perméabilité** exigent un temps d'intervention plus long et le matériel d'essais est plus encombrant, mais les informations qu'ils apportent sont importantes pour le diagnostic de la digue. Certains essais sont systématiquement accompagnés d'enregistrement de paramètres, tels que la vitesse d'avancement du forage dans le sol, qui permettent de déduire certaines propriétés mécaniques (compacité en particulier).

Les **forages mécaniques destructifs** permettent d'extraire des matériaux en place, et d'en vérifier *de visu* la nature. Ils permettent, en outre, de prélever des échantillons remaniés pour des essais ultérieurs en laboratoire de mécanique des sols. Les **forages mécaniques carottés** permettent de prélever des échantillons intacts, les carottes, directement dans l'ouvrage. Ces échantillons sont ensuite préparés pour des analyses plus complètes en laboratoire. Là encore, l'exécution de ces forages est quasi systématiquement accompagnée d'enregistrement de paramètres qui donnent immédiatement des renseignements sur certaines propriétés mécaniques des sols traversés.

L'**essai au phicomètre** est un des seuls essais (avec le scissomètre) qui permet de mesurer, dans un forage, la contrainte de cisaillement des matériaux en place, y compris pour des matériaux que les forages carottés ne peuvent prélever.

3.4.3 Programme de reconnaissance systématique et/ou optimisé

Un programme type des reconnaissances géotechniques a été proposé dans le cadre du guide méthodologique appliqué aux levées de la Loire moyenne (Lino *et al.*, 2000) :

- *tous les 200 m* : en crête de digue, réalisation d'**essais pénétrométriques** (statique, dynamique classique ou dynamique léger), jusqu'à atteindre la fondation généralement comprise entre 8 et 12 m. Cette valeur (200 m) a été choisie en fonction de la dimension moyenne des brèches historiques apparues lors des crues du siècle dernier ;
- *tous les 2 km* : en crête de digue, côté val, réalisation d'un **forage carotté** poursuivi en fondation (12 à 15 m) et équipé d'un piézomètre avec :
 - deux **prélèvements d'échantillon** intact (et essai en laboratoire) ou trois essais au **phicomètre**, dont 1 en fondation,
 - deux **essais de perméabilité**, dont 1 en fondation ;
- *en bas de talus, côté val* : réalisation d'un **forage destructif avec enregistrement de paramètres**, poursuivi en fondation (5 à 10 m) et équipé d'un piézomètre ;
- *en section transversale* : une **prospection de type panneau électrique**, éventuellement radar, pour corréliser les informations géotechniques ponctuelles avec les données d'un profil géophysique transversal.

Si on s'intéresse uniquement aux caractéristiques de perméabilité de la digue, les reconnaissances systématiques pourront se baser sur l'utilisation du Perméafor, dont le rendement est de l'ordre de quatre essais par jour.

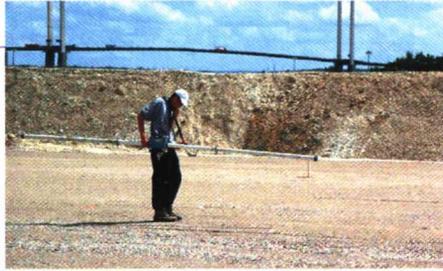
Il est évident que ce type de programme doit être adapté au cas par cas. Les études géophysiques, préalablement déployées, doivent en particulier permettre de minimiser le nombre d'essais géotechniques à réaliser.

Par exemple, un profil de résistivité apparente, obtenu avec une méthode Slingram sur un grand linéaire, peut présenter une « allure » constante sur toute une portion de la digue, dénotant une mise en place homogène des matériaux le long de ce tronçon d'ouvrage, et montrer des variations fortes de résistivité sur un autre tronçon, y dénotant une mise en place hétérogène (consécutive, par exemple, aux travaux de réparation d'une brèche). En accord avec le géophysicien, le géotechnicien pourra adopter une maille plus large pour le tronçon de digue homogène, et, au contraire, resserrer le pas des essais géotechniques sur les tronçons hétérogènes.

Ainsi, les reconnaissances géotechniques contribuent, d'une part, à l'amélioration de l'interprétation des données géophysiques, et, d'autre part, à l'amélioration du modèle géotechnique de la digue et, enfin, à la définition de zones spécifiques sur lesquelles le déploiement d'une méthode géophysique locale de type panneau électrique s'avérera opportuniste.

4

LES MÉTHODES DE RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES



Pour le diagnostic des digues à sec, la reconnaissance géophysique débute par une campagne à grand rendement, réalisée avec des méthodes électromagnétiques basse fréquence de type Slingram. Les méthodes comme la radio magnétotellurique (Radio-MT) ou le radar peuvent aussi donner des résultats, mais la première est délicate à mettre en œuvre et à interpréter, et la seconde n'a qu'un champ d'applications restreint. Ces méthodes ont pour objectif de déterminer les zones hétérogènes de la digue susceptibles d'évoluer défavorablement lors de la crue.

L'information recueillie sous forme de profil par les méthodes électromagnétiques basse fréquence reste souvent trop globale pour décrire précisément la géométrie de la digue, et des reconnaissances géophysiques locales par panneau électrique sont alors nécessaires. De même, la sismique réfraction peut compléter efficacement la phase des reconnaissances.

4.1 Reconnaissance à grand rendement avec la méthode Slingram

C'est une méthode électromagnétique basse fréquence en champ proche. L'information obtenue, la résistivité apparente, est donnée sous forme de profil rendant compte de la répartition grossière des hétérogénéités de la levée. Largement déployée dans le cadre du projet national CriTerre, c'est la méthode prioritairement préconisée pour le diagnostic à grand rendement des digues à sec.

4.1.1 Principe

Les méthodes basse fréquence en champ proche présentées ici ont comme émetteur et récepteur des dipôles magnétiques (boucles de courant) verticaux ou horizontaux par rapport au sol. La source génère un champ magnétique primaire à une fréquence donnée *via* une bobine d'induction reliée à une source oscillante. Lorsque le champ primaire rencontre une anomalie conductrice, un champ secondaire, beaucoup plus faible, est créé.

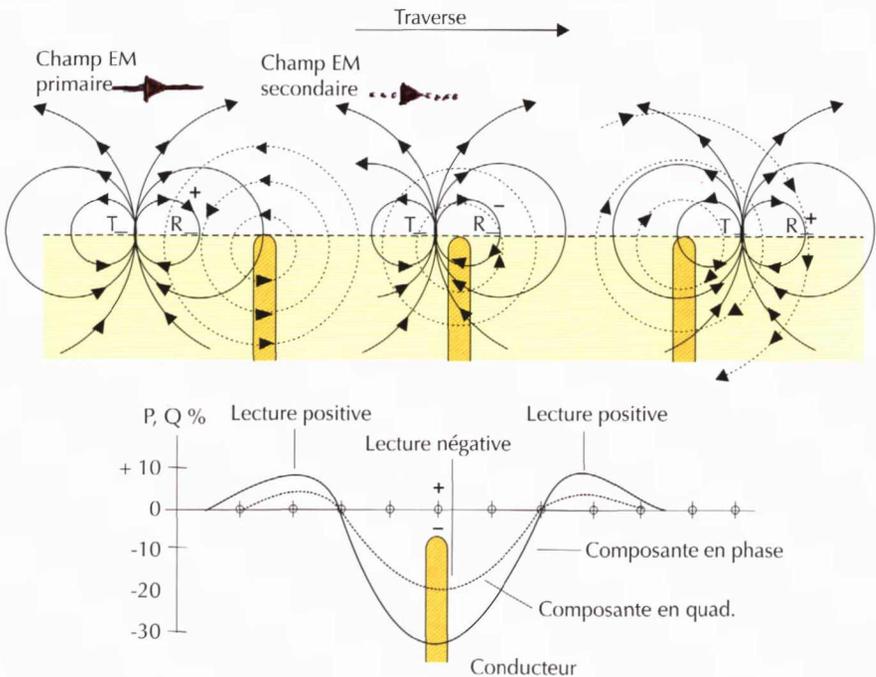


Figure 14 – Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche : cas d'un système Slingram en dipôle magnétique vertical (2 boucles coplanaires posées sur le sol, configuration HCP ou mode VD) (Chouteau, 2001)

4.1.2 Grandeur mesurée en méthode Slingram

C'est la mesure du rapport de la composante du champ secondaire en quadrature par rapport au champ primaire qui va permettre de décrire au mieux les hétérogénéités conductrices du sous-sol en termes de **conductivité apparente** σ_a (S/m), inverse de la **résistivité apparente** ρ_a ($\Omega.m$).

Dans le type de dispositif de la figure 14 (cas de bobines horizontales coplanaires HCP), la composante en quadrature est directement proportionnelle au champ secondaire. À une distance séparant l'émetteur du récepteur très inférieure à une longueur d'onde dans le sol, ce champ présente un déphasage de 90° par rapport au champ primaire. Ces méthodes sont dites à faible nombre d'induction (le facteur de propagation k à la distance r est tel que $|kr| \ll 1$). Ce paramètre caractéristique est noté NI et est défini pour ces méthodes par :

$$NI = |kr| = s/\delta \text{ et ici } NI \ll 1$$

où δ (m) est l'épaisseur de peau définie par $\delta = \sqrt{2/\pi f \mu_0 \sigma_a}$ et s (m) la distance émetteur récepteur. Le rapport des champs magnétiques primaire et secondaire en quadrature est alors directement proportionnel à la conductivité apparente du terrain :

$$\frac{|H_s|}{|H_p|} = \frac{NI^2}{2} = \frac{\pi f \mu_0 \sigma_a s^2}{2} \text{ et } \sigma_a = \frac{|H_s|}{|H_p|} \frac{2}{\pi f \mu_0 s^2} = \frac{1}{\rho_a} \text{ (S/m)}$$

où $|H_p|$ et $|H_s|$ sont respectivement les modules des champs magnétiques primaire et secondaire, f est la fréquence (Hz) de l'onde émise dans la boucle émettrice et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

Les formules des champs électromagnétiques sont données par Spies et Frischknecht (1991), en champ proche et en champ lointain, dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel, en espace libre et au-dessus d'un demi-espace homogène, pour les configurations Slingram les plus répandues. Pour des modèles plus complexes, des logiciels permettent la modélisation de la réponse en mode Slingram.

4.1.3 Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation annoncée par les constructeurs est la profondeur pour laquelle le dispositif est sensible en champ proche à la présence d'une couche conductrice. *Elle est indicative et dépend fortement de la nature du sol.*

Ce type d'appareil fonctionne généralement avec des fréquences de l'ordre de quelques kHz. Les distances entre bobines (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) sont telles que la réponse au champ émis, dans la gamme de résistivité apparente des terrains les plus fréquemment rencontrés, se fait en champ proche (le nombre d'induction NI est tel que $NI \ll 1$). Dans ces conditions, seules la distance s entre bobines et leur orientation par rapport à la surface influent sur la profondeur d'investigation.

Ainsi, pour un dispositif à dipôles magnétiques verticaux (**mode VD**), les bobines coplanaires sont horizontales par rapport au sol (configuration encore appelée

HCP) et la réponse du système ($\phi_v(z)$) à la présence d'une couche conductrice située à une profondeur d est maximale pour une profondeur de l'ordre de 0,5 fois la distance s ($z = d/S$) et significative jusqu'à 1,5 s (**profondeur d'investigation en configuration HCP ou mode VD**).

Pour un dispositif à dipôles magnétiques horizontaux (**mode HD**), les bobines coplanaires sont verticales par rapport au sol (configuration encore appelée **VCP**), et les couches superficielles contribuent majoritairement à la réponse du système ($\phi_h(z)$) jusqu'à 0,5 s (**profondeur d'investigation en configuration VCP ou mode HD**). Ainsi, une mesure en configuration HCP ou en mode VD rend compte de la répartition des conductivités apparentes plus en profondeur qu'en configuration VCP ou en mode HD.

L'intégration des fonctions ϕ en fonction de la profondeur normalisée z donne la réponse cumulative du terrain (figure 15). Ces courbes permettent aisément d'interpréter les mesures au-dessus de milieux tabulaires lorsque le nombre de couches est connu (McNeill, 1980a et 1980b).

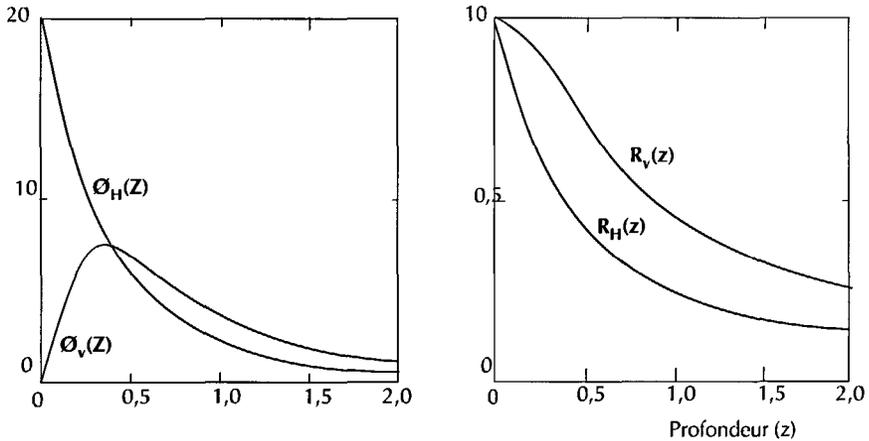


Figure 15 - a) Réponses des dispositifs verticaux et horizontaux à une couche conductrice située à une profondeur d en fonction de la profondeur normalisée $z = d/s$ avec s la distance entre bobines. b) L'intégration de ces réponses sur la profondeur z $R_h(z)$ et $R_v(z)$, donne la réponse cumulative de chaque tranche de terrain pour les deux types de dispositifs

4.1.4 Résultats attendus

Les résultats attendus sont illustrés sur la figure 14. Ils représentent le rapport de la composante du champ secondaire en quadrature par rapport au champ primaire. Mais on traduit ces profils en termes de conductivité apparente (S/m) et, plus fréquemment, de résistivité apparente ($\Omega.m$), dont la représentation qualitative est identique à celle de la figure 16.

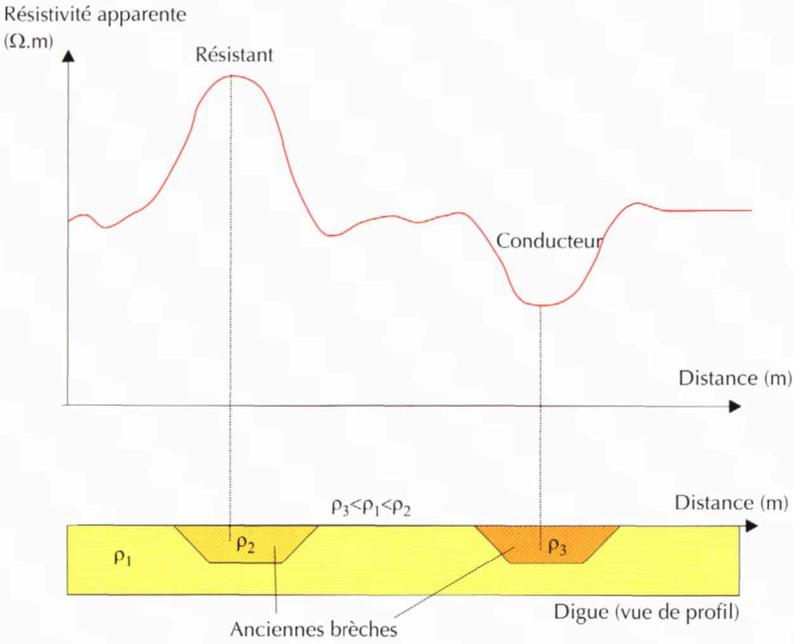


Figure 16 – Représentation qualitative d'un profil Slingram au-dessus d'une digue avec une anomalie résistante et une anomalie conductrice

4.1.5 Méthodologie

Le choix de la distance entre boucles dépend de la profondeur de pénétration souhaitée que l'on peut choisir en fonction du type d'appareil (exemple de méthodes Slingram type EM31 et EM34 sur le tableau 2).

	Orientation	Offset (m)	Fréquence (Hz)	Profondeur de pénétration (m)
EM31 <i>geomics</i>	H	3,66	9 800	3,7
EM31 "	V	3,66	9 800	5,5
EM34 <i>geomics</i>	H	10,0	6 400	10
EM34 "	V	10,0	6 400	15
EM34 "	H	20,0	1 600	20
EM34 "	V	20,0	1 600	30
EM34 "	H	40,0	400	40
EM34 "	V	40,0	400	60

Tableau 2 – Paramètres pour les appareils dipolaires basses fréquences EM31 et EM34. L'offset est la distance, fixe, entre les deux boucles émettrice et réceptrice.

Les boucles sont préférentiellement alignées dans le sens de la digue pour des profils longitudinaux comme pour les profils transversaux, afin d'éviter les erreurs d'interprétation dues à la topologie de la digue et à la nature de ses matériaux de surface, car ceux-ci sont généralement disposés de manière homogène longitudinalement. Ceci signifie, par exemple, que la perche d'un EM31 pour des mesures longitudinales sera orientée dans le sens de la progression.

Les profils sont généralement conduits en crête et en pied de digue, côté val et côté fleuve, si possible selon les deux modes de polarisation (VCP et HCP).

La maille adoptée entre deux points de mesure est généralement de 5 m. Suivant le niveau de détail souhaité, elle peut être inférieure et de l'ordre du mètre. Le rendement en acquisition point par point pour des dispositifs portables par un seul opérateur, maintenu à une hauteur constante (environ 1 m) au-dessus du sol, est variable sachant qu'on peut l'utiliser pour des zones non carrossables et difficiles d'accès : il est légèrement inférieur à la vitesse de marche de l'opérateur. Dans le cas où le dispositif nécessiterait des distances entre boucles plus importantes, deux opérateurs sont nécessaires. Le rendement est alors moindre et plus difficile à quantifier.

Le mode grand rendement a été testé au printemps 2004 pour l'appareil EM31, les dimensions de ce dispositif permettant aisément de le tracté par véhicule. L'appareil, sensible aux objets métalliques, était situé à environ 6 m du véhicule. Il a été tracté à la vitesse d'environ 5 km/h (figure 17) et posé sur un tapis d'usure au sol. D'autres expérimentateurs réalisent les mesures en continu et en marchant, le positionnement des mesures étant assuré par GPS.

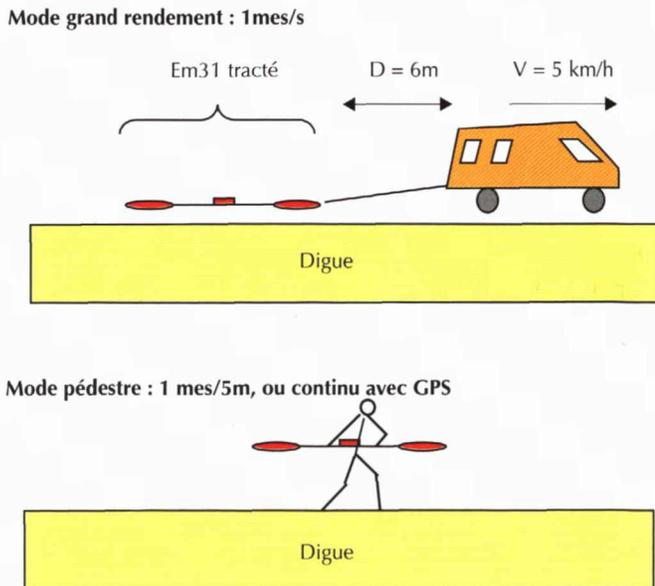


Figure 17 – Mode de mesure adopté sur digue avec l'appareil EM31

Le mode de mesure à grand rendement testé reste envisageable pour les dispositifs permettant d'atteindre des profondeurs plus importantes. Des développements expérimentaux sont à l'étude dans ce domaine.

4.1.6 Interprétation des résultats

L'interprétation est tout d'abord qualitative : la présence d'une anomalie conductrice se traduit par l'augmentation de la conductivité apparente mesurée (et, inversement, d'une diminution de la résistivité apparente mesurée). Par ailleurs, l'anomalie conductrice se traduit par une diminution locale du rapport d'amplitude du champ vertical sur le champ horizontal, en phase et en quadrature. Une première approche quantitative peut être faite en fonction des données des études préliminaires. Ainsi, les **zones comblées d'anciennes brèches et de surverses** ont été bien mises en évidence par ces méthodes. De même, la réalisation de profils côté val et côté fleuve laisse envisager la possibilité de détecter des anomalies transversales.

Ces premières mesures aident à l'implantation des sondages géotechniques. L'analyse de ces sondages en termes de type de matériau et de profondeur permet d'extrapoler ses propriétés à l'ensemble des profils et apporte une information quantitative supplémentaire sur l'extension et la profondeur des anomalies. Des méthodes de modélisation et d'inversion permettent d'affiner l'analyse des résultats. De manière générale, à contraste égal de résistivité entre l'encaissant et l'anomalie, une anomalie conductrice est plus facilement détectable qu'une anomalie résistante.

4.1.7 Exemples de mesure

Les mesures présentées ici ont été réalisées à l'aide de l'appareil EM31 de Geonics à Saint-Laurent-de-la-Salanque (66), sur la digue de l'Agly (rive gauche), fleuve côtier méditerranéen. Les profils ont été obtenus côté val et côté fleuve, en bordure de chaussée située en crête de digue, selon les deux modes de mesure. Les profondeurs d'investigation sont respectivement de l'ordre de 4 m en mode HD ou configuration VCP et de 6 m en mode VD ou configuration HCP.

La zone de brèche de Saint-Laurent (entre 400 et 600 m sur la figure 18), comblée par des matériaux plus ou moins grossiers, présente une signature bien visible. Plus en aval, d'autres anomalies de plus forte résistivité sont présentes dans le secteur où l'on sait que des surverses plus ou moins larges se sont produites. Globalement, les mesures profondes sont moins résistantes car elles englobent les matériaux plus conducteurs situés plus en profondeur dans le corps de digue. La chaussée, constituée de matériaux bitumineux et graveleux plus résistants, participe de manière plus importante aux valeurs des résistivités apparentes des mesures superficielles (mode HD ou configuration VCP).

Deux modes d'acquisition ont été réalisés : **mode pédestre** avec une mesure tous les 5 m, et **mode grand rendement** avec une mesure toutes les 1 s. L'appareil est aligné dans le sens de la digue, tracté derrière un véhicule à la vitesse de 5 km/h, soit un point tous les 1,45 m environ. L'intervention a duré une demi-journée. Les mesures en mode point par point et en mode grand rendement sont comparées sur la figure 19. Un zoom sur la zone de brèche est repéré sur la figure 19.

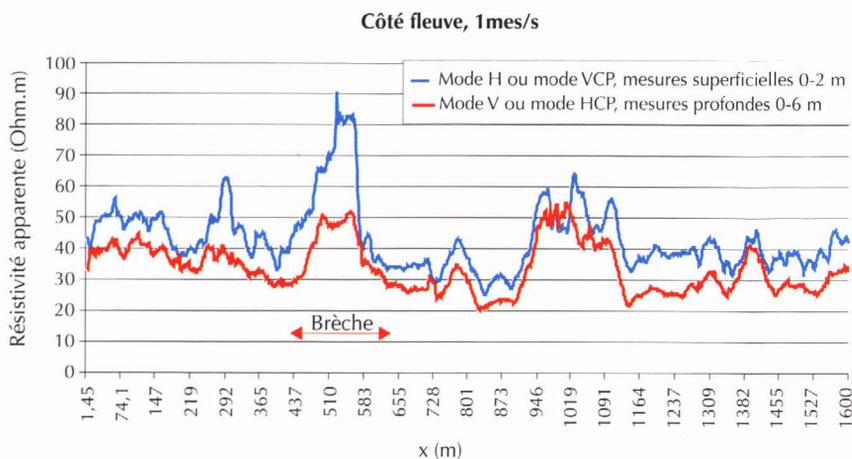


Figure 18 – Profils de résistivité apparente EM31, rive gauche, côté val sur la digue de l'Agly

La réalisation de profils côté val et côté fleuve (figure 20) permet aussi d'apprécier le degré d'hétérogénéité de la digue dans le sens transversal. Il faut cependant garder un regard critique sur de tels résultats, car on ne peut généralement réaliser qu'au plus deux profils en crête de digue.

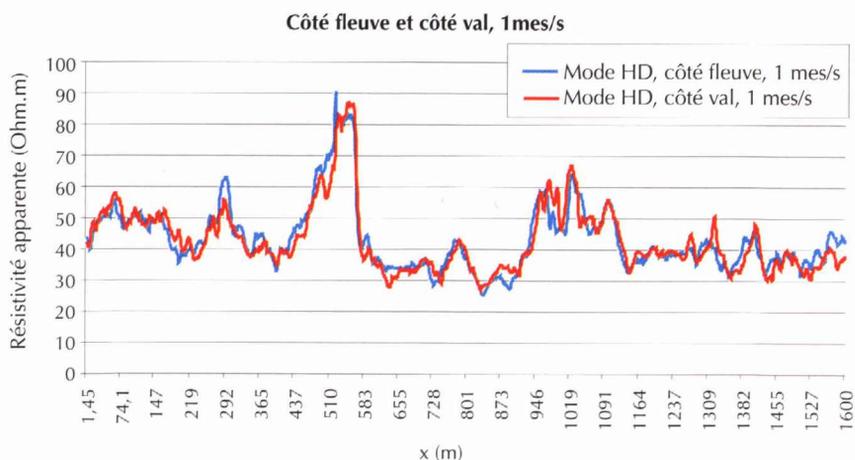


Figure 20 – Deux profils Slingram en mode HD, côté val et côté fleuve, permettent d'apprécier le degré d'hétérogénéité transversal de la digue

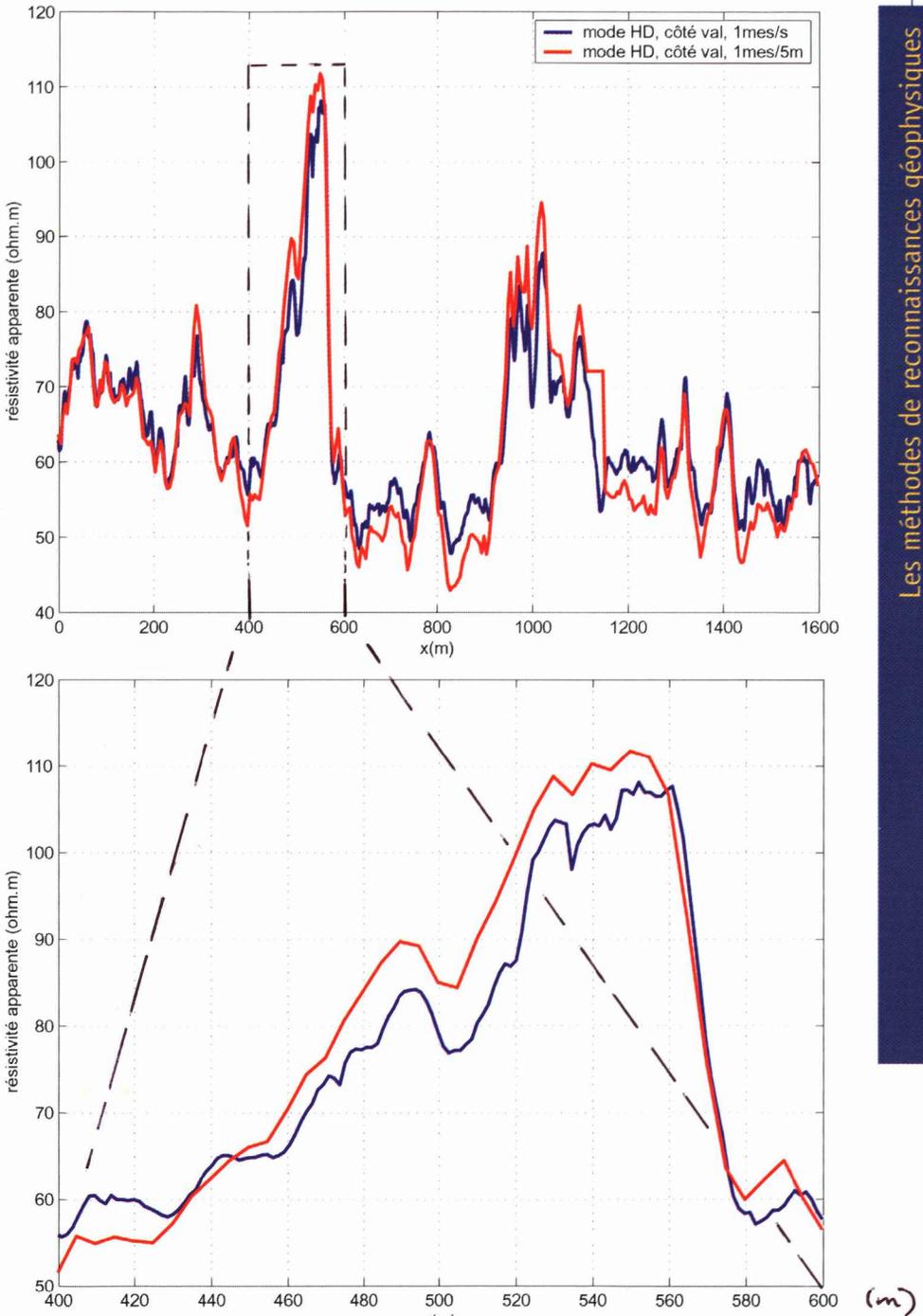


Figure 19 – Comparaison entre un profil obtenu avec un point tous les 5 m, et un profil en continu avec une mesure par seconde

L'exemple suivant est issu des mesures géophysiques réalisées sur les digues du Cher (Wakselman, 1999). Il est réalisé avec l'appareil EM34 de Geonics, avec un pas de mesure de 5 m et une distance entre bobines de 10 m. La structure de la digue est représentée sur la figure 21.

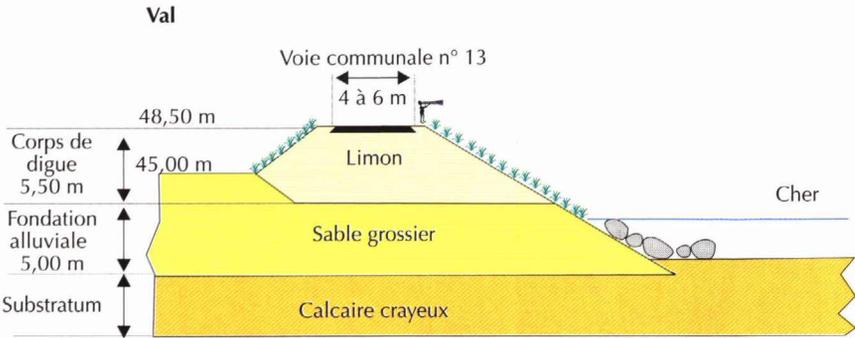


Figure 21 – Coupe en travers de la digue du Cher (hameau de Grand Moulin, rive droite du Cher en aval de Tours)

Les mesures (figure 22) réalisées pour deux profondeurs d'investigation différentes (7 et 15 m environ) montrent bien que les matériaux plus proches de la surface (corps de digue constitué de limon) sont ici moins résistants que les couches profondes (fondation alluviale sableuse et *substratum* crayeux). Elles montrent aussi la présence d'une canalisation enterrée, proche de la surface (à 3 m) et repérée lors de l'inspection visuelle, une zone d'ancienne brèche, plus résistante et comportant une anomalie plus conductrice, dont l'origine n'est pas bien déterminée, et une zone de baisse de résistivité en fin de profil, correspondant à la présence du ballast SNCF qui s'appuie sur le corps de digue : la présence d'un environnement conducteur (ligne SNCF) influence ici fortement sur les mesures.

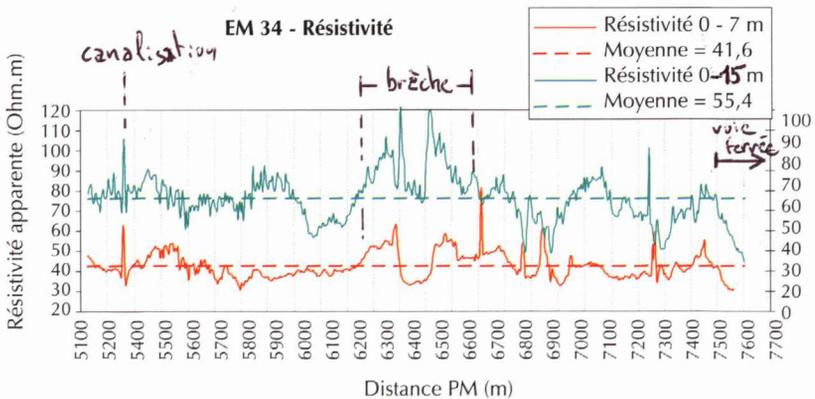


Figure 22 – Mesure EM34 selon deux profondeurs d'investigation sur la digue du Cher (doc. EDG)

4.1.8 Conclusion

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ dipolaire sont des méthodes à profondeur de pénétration optimale pour l'auscultation des corps de digue et de la partie supérieure de leur fondation. En effet, différentes profondeurs d'investigation sont atteintes lorsqu'on peut faire varier l'orientation des bobines et la distance qui les sépare. Le pas de mesure dépend du niveau de détail souhaité et peut être de l'ordre du mètre. Leur rendement en mode pédestre est légèrement inférieur à la vitesse de marche du ou des opérateurs. Des applications à grand rendement en crête de digue circulaire sont néanmoins envisageables et ont été testées avec succès sur une digue de l'Agly, pour un type de dispositif particulier, dont la profondeur d'investigation n'atteint que 6 m. La mise en œuvre d'appareils tractables derrière un véhicule, et permettant d'atteindre des profondeurs d'au moins 10 mètres, reste à étudier. L'interprétation des résultats doit être impérativement corrélée avec les études préalables et confiée à un géophysicien expérimenté.

4.2 Reconnaissance à grand rendement avec la méthode radio magnétotellurique

La méthode radio magnétotellurique (Radio-MT) est une méthode électromagnétique basse fréquence en champ lointain.

Elle utilise les émetteurs militaires et commerciaux destinés à la radiocommunication dans la gamme de fréquences de 10 kHz à 1 MHz (la gamme VLF en radio s'étend de 3 à 30 kHz, la gamme LF de 30 à 300 kHz, la bande MF de 300 kHz à 3 MHz).

Historiquement, dans le cadre du projet national CriTerre, ce fut la méthode grand rendement la plus déployée. Aujourd'hui, il apparaît cependant que la mise en œuvre et l'interprétation de la méthode restent délicates.

4.2.1 Principe

a) CHAMP PRIMAIRE ET CHAMP SECONDAIRE

Les émetteurs radio utilisés comme champ source pour la méthode sont considérés comme lointains : les ondes électromagnétiques reçues au point de mesure, c'est-à-dire en crête de digue ou en pied de digue, sont planes. Ces ondes se propagent à la surface du sol. En présence d'une anomalie conductrice ou résistante, le champ induit est modifié en surface. Trois phénomènes interviennent (Chouteau, 2001) :

- la production par une source d'un champ électromagnétique primaire, variable dans le temps ;
- ce champ induit des courants (courants de Foucault) dans le sol ;
- ces courants sont modifiés par la présence d'hétérogénéités.

Pour une hétérogénéité 3D bornée, deux mécanismes complémentaires peuvent intervenir (West et Macnae, 1991 ; Bourgeois, 2000) :

- un **effet d'induction**, produit par le flux du champ magnétique primaire à travers l'hétérogénéité (loi de Faraday). Cet effet est généralement qualifié d'**effet vortex**, car

il génère des courants de Foucault tourbillonnaires à l'intérieur du corps. Il n'existe que pour un corps conducteur.

– un **effet statique**, produit par la déviation par l'hétérogénéité des courants de Foucault induits dans le milieu hôte ; cet effet est qualifié d'**effet galvanique**, car il est identique dans son principe aux méthodes électriques. La déviation des courants est une concentration des courants vers l'intérieur du corps si ce dernier est relativement conducteur, ou au contraire un contournement autour du corps si ce dernier est relativement résistant.

Remarque : les méthodes d'onde plane fonctionnent essentiellement par l'effet galvanique (McNeil et Labson, 1991, pp. 576-577). Il n'y a que dans les milieux très résistants ($> 10^4 \Omega.m$) que l'effet vortex prédomine. Ces méthodes sont donc comparables aux méthodes électriques en courant continu. À ce titre, elles sont sensibles non seulement à la présence d'objets conducteurs, mais aussi à celle d'objets résistants.

b) POLARISATION

Enfin, la réponse d'une anomalie dans le sol dépend de son allongement par rapport à la direction du champ primaire. On distingue ainsi :

– la **polarisation H** pour laquelle le champ magnétique primaire est parallèle à l'allongement de l'hétérogénéité. La réponse du corps se manifeste essentiellement par son effet statique ;

– la **polarisation E** pour laquelle le champ magnétique primaire est perpendiculaire à l'allongement de l'hétérogénéité. La réponse du corps se manifeste par la création d'un champ électromagnétique secondaire, dont on mesure les composantes magnétiques verticales, en phase et en quadrature avec la composante horizontale, à l'aide de boucles au-dessus du sol.

4.2.2 Grandeurs mesurées en Radio-MT

En Radio-MT, les grandeurs mesurées (figure 23) sont le champ électrique horizontal secondaire E_x induit dans le sol, et le champ magnétique horizontal H_y résultant du champ primaire H_{py} et du champ secondaire H_s (en général, $H_s \ll H_{py}$).

Le rapport complexe E_x/H_y , égal à l'impédance électromagnétique de surface, donne accès aux paramètres suivants :

– la **résistivité apparente** (en $\Omega.m$), obtenue par la formule de Cagniard (1953), et représentée le long d'un profil. La résistivité apparente est égale à la résistivité d'un sol homogène équivalent au sol vrai (c'est-à-dire rendant compte des mesures de E et de H) :

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$

μ_0 étant la perméabilité magnétique du vide, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ (H.m⁻¹), et f (Hz) la fréquence radio utilisée.

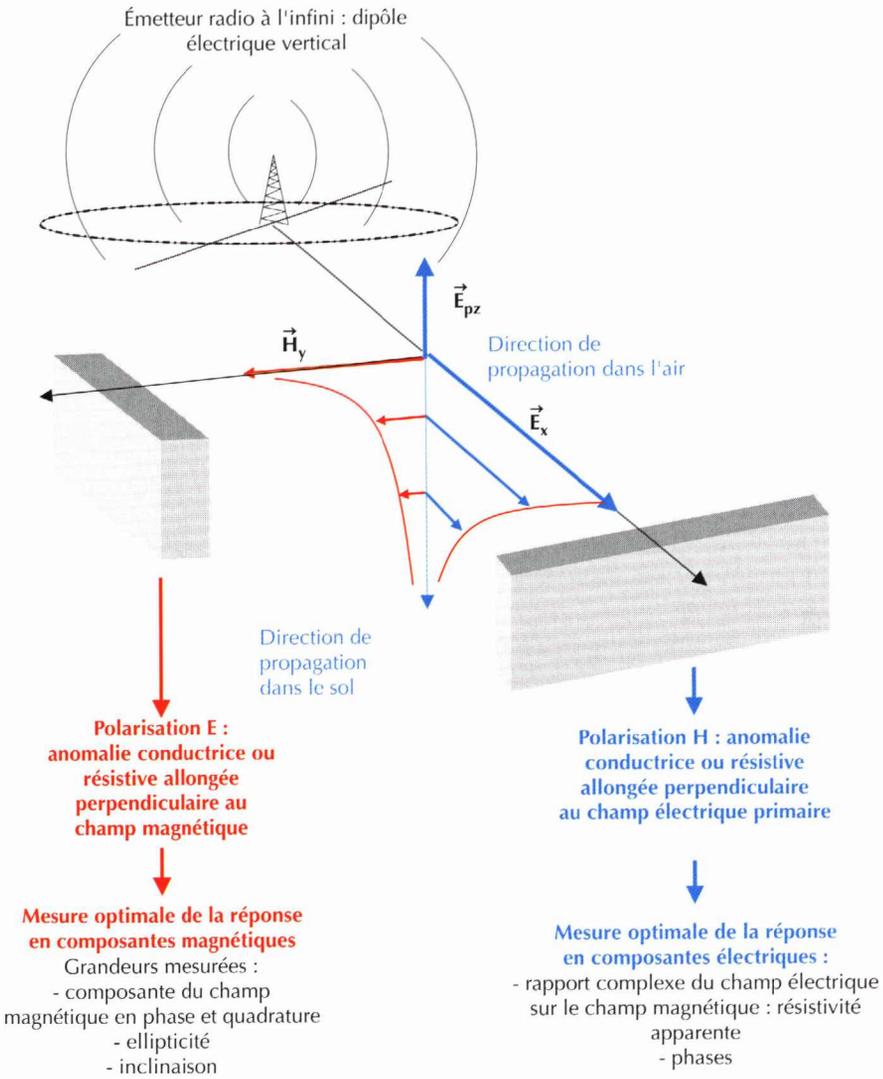


Figure 23 – Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain, polarisations et modes de mesure

– la **phase** du champ électrique par rapport au champ magnétique (= déphasage).
 Quand le sol est homogène, la résistivité apparente est égale à la résistivité vraie. La phase φ est égale à 45° . Toute autre valeur révèle la présence d'une hétérogénéité : une phase inférieure à 45° implique une succession « conducteur sur résistif » et une phase supérieure à 45° implique une succession « résistif sur conducteur ».

4.2.3 Corrections des mesures en mode résistivité : verticalisation et invariants

La polarisation du champ primaire introduit une anisotropie qui se manifeste par un allongement de l'anomalie de résistivité apparente mesurée dans une direction perpendiculaire au champ électrique primaire. Deux solutions sont envisageables pour corriger cet effet :

- lorsqu'un seul émetteur est disponible, la **verticalisation** du champ électrique E_x (Tabbagh *et al.*, 1991) permet d'obtenir des cartes de résistivité qui décrivent plus justement la répartition des corps dans le sol.
- l'utilisation de **deux émetteurs orthogonaux aux fréquences proches** est préférable. On montre alors (Guérin *et al.*, 1994) qu'il est préférable de calculer l'un ou l'autre des deux invariants suivants :

$$\rho_{inv1} = \left(\frac{\sqrt{\rho_{a1}} + \sqrt{\rho_{a2}}}{2} \right)^2 \quad \text{ou} \quad \rho_{inv2} = \sqrt{\rho_{a1}\rho_{a2}}$$

où ρ_{a1} est la résistivité apparente mesurée avec l'émetteur 1, ρ_{a2} est la résistivité apparente mesurée avec l'émetteur 2, et où l'émetteur 1 et l'émetteur 2 sont orthogonaux. À moins de disposer d'un appareil multicapteur et multifréquence, ce traitement double le temps d'intervention mais permet d'affiner la qualité et l'interprétation des résultats. De plus, des mesures menées avec des émetteurs à 70° et à 50° ont montré que le calcul des invariants donnait encore de bons résultats.

4.2.4 Profondeur de pénétration

Une notion importante est la profondeur de pénétration (ou épaisseur de peau), profondeur pour laquelle l'amplitude des champs est divisée par $e^{-2,718}$; elle vaut :

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

On considère généralement que la **profondeur d'investigation** (figure 24) des méthodes basse fréquence en onde plane est égale à la **moitié de la profondeur de pénétration**.

À une fréquence donnée, plus un milieu est résistant, et plus la profondeur de pénétration est importante.

Pour un terrain donné, plus la fréquence de mesure est basse, et plus la profondeur de pénétration est grande (figure 24).

Exemple : pour un corps de digue homogène dont la résistivité est de 50 $\Omega.m$, pour une fréquence de 162 kHz, l'épaisseur de peau est d'environ 9 m, la profondeur d'investigation sera de l'ordre de 4,5 m.

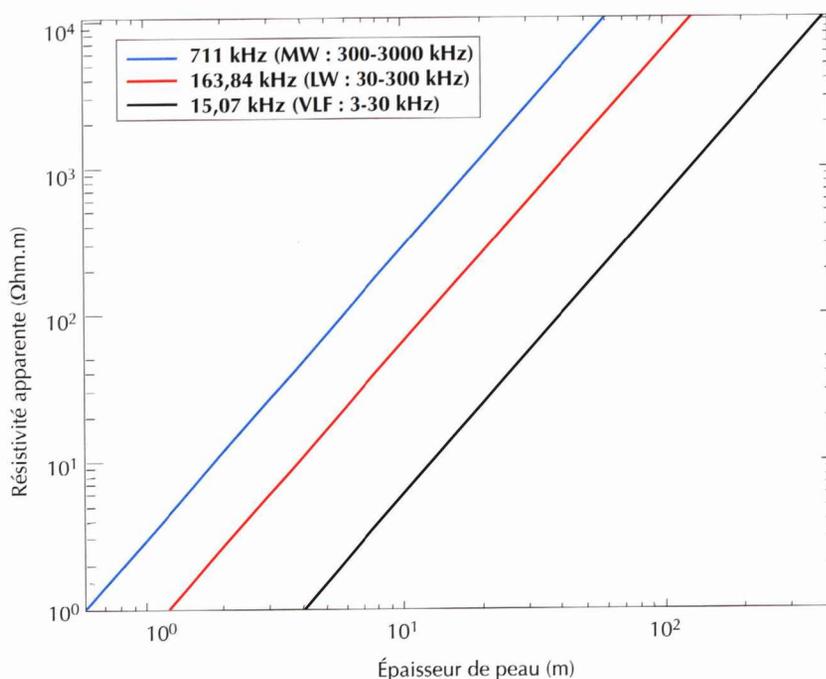


Figure 24 – Profondeur de pénétration en fonction de la résistivité apparente pour quelques fréquences usuelles

4.2.5 Résultats attendus

Le résultat attendu (figure 16) est un profil représentant la résistivité apparente (en $\Omega.m$) de la digue en fonction de la distance parcourue en surface. L'échelle de résistivité est généralement logarithmique.

4.2.6 Méthodologie

L'idéal est de conduire les mesures selon les deux modes de polarisation H et E, et donc de disposer de deux émetteurs de fréquences proches, dont les champs sont perpendiculaires entre eux, au niveau de la surface de mesure. Après avoir estimé la résistivité apparente moyenne de la digue, il faudrait sélectionner deux autres fréquences pour avoir, dans chaque mode de polarisation, une investigation relative au corps de digue, et un autre relative à la fondation. Il est ensuite conseillé, pour une fréquence donnée, de réaliser un profil côté val et un profil côté fleuve. Au total, cela ferait au moins huit profils. Si d'autres fréquences sont disponibles, alors d'autres profils sont réalisables et l'information recueillie est plus riche.

Expérimentalement, il est difficile d'avoir sur le terrain deux champs électriques orthogonaux et de fréquences proches. Généralement, deux voire trois fréquences sont disponibles, si bien que la prise en compte des invariants de résistivité ou de la verticalisation n'est pas facilement réalisable.

Des tests de répétitivité menés sur chaussée ont montré la stabilité de la méthode (Chevassu *et al.*, 1990 ; figure 25). Ce n'est pas le cas sur les digues : les expérimentations menées sur l'Agly avec différents appareils ont montré la nécessité de réaliser, à une fréquence donnée et pour un trajet donné, au moins trois profils (Fauchard et Mériaux, 2004). Le rendement est alors diminué et l'expérience montre que la méthode est très sensible aux hétérogénéités de surface, lesquelles sont responsables de pics de résistivité apparente qui donnent une allure très bruitée aux mesures et masquent ainsi la répartition des matériaux plus profonds.

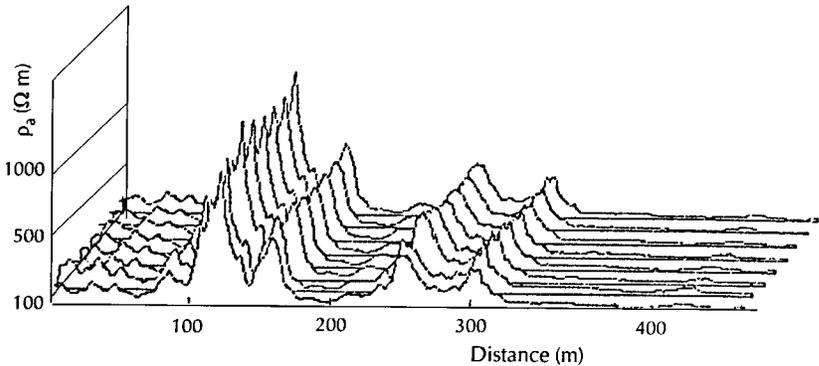


Figure 25 - Répétitivité des mesures Radio-MT sur chaussée (8 passages successifs à 711 kHz)

Le dispositif de mesure est un appareil du laboratoire central des ponts et chaussées (figure 26). Il est présenté ici, mais d'autres dispositifs existent (Bosch et Müller, 2001).

Le champ électrique est mesuré à l'aide d'une ligne électrique de quelques mètres de longueur, **parallèle à la direction du champ électrique incident**, reliée à une paire d'électrodes conductives ou capacitives en contact avec le sol. Dans le dispositif utilisé, le contact est capacitif. Le champ magnétique est mesuré par une boucle de cuivre qui s'oriente automatiquement en fonction de l'intensité du champ magnétique reçu et assure ainsi l'alignement parallèle du tapis d'électrodes capacitives avec le champ électrique incident. Un ensemble de filtres et de capteurs permet la sélection de la fréquence, l'amplification et la détermination de la résistivité apparente.

L'ensemble constitué du tapis, des boucles et des électrodes est tracté par un véhicule pour des applications à grand rendement sur des digues carrossables. Des essais jusqu'à 30 km/h ont été réalisés sur chaussées (Chevassu *et al.*, 1990), mais la vitesse courante utilisée est de l'ordre de 5 km/h.

Une roue codeuse peut contrôler l'enregistrement pas à pas des champs électrique et magnétique vers une unité d'enregistrement, généralement un PC, reliée à la chaîne d'acquisition.

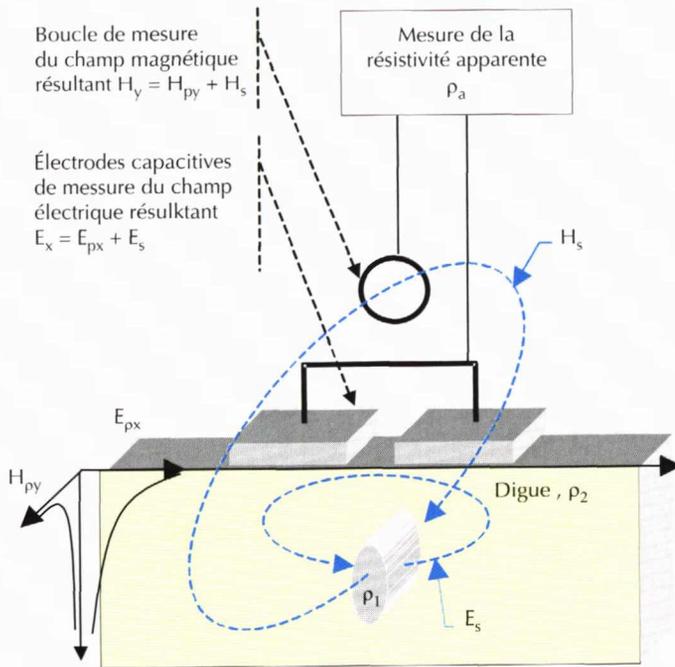


Figure 26 – Principe du dispositif Radio-MT du LCPC

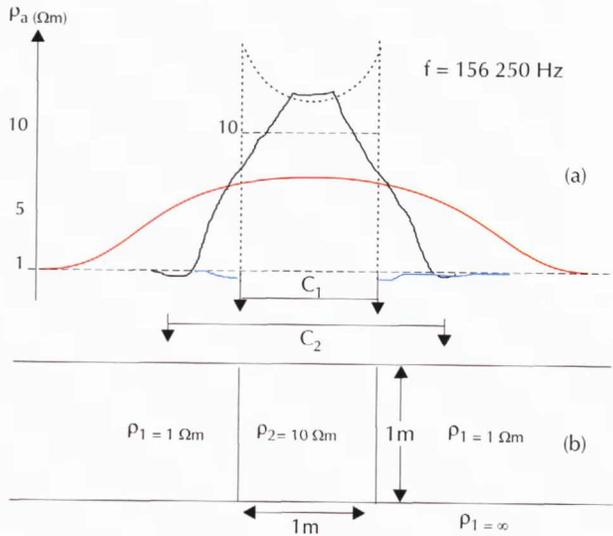
La distance entre électrodes est choisie en fonction du niveau de détail souhaité (figure 27). Un espace d'un mètre entre électrodes permet une auscultation plus détaillée du corps de digue. Des exemples réalisés avec plusieurs tapis sont donnés sur la figure 31.

Pour des capteurs capacitifs, la couverture du terrain est, par ailleurs, à prendre en compte : la présence de végétaux et d'irrégularités topographiques affectent la qualité des mesures. Pour cette raison, la méthode Radio-MT en mode capacitif est utilisée si la crête de digue est carrossable. Sinon, les méthodes à électrodes conductives sont envisageables, de même que les méthodes en mode inclinaison, ou méthodes VLF-EM.

4.2.7 Interprétation des mesures

L'interprétation des mesures est, dans un premier temps, **qualitative**. Elle permet difficilement de caractériser en profondeur et en dimension les anomalies mesurées, sauf dans des cas particuliers comme la détermination de l'épaisseur de recouvrement d'une couche conductrice sur une couche résistante.

L'interprétation **quantitative** se réalise tout d'abord avec les résultats des études préalables. Il est important de noter que les expérimentations menées dans le cadre



(a) anomalie théorique (.....) de résistivité apparente au-dessus d'une structure à deux dimensions schématisées en (b) (polarisation H)

- anomalie observée avec un capteur de champ électrique C_1 d'une longueur de 1 m
- anomalie observée avec un capteur C_2 d'une longueur de 2 m
- profil de résistivité vraie du terrain en surface

Figure 27 – Anomalie de résistivité apparente d'une structure métrique en fonction de la distance entre capteurs (Lagabrielle, 1986)

du projet national CriTerre ont montré les nombreuses corrélations que l'on peut faire entre les résultats de l'inspection visuelle et les valeurs des résistivités mesurées. En particulier, elles mettent bien en évidence les **zones hétérogènes longitudinales** de la digue, comme les **anciennes brèches** et les **zones d'anciennes surverses**. En effet, les zones ayant subi des dégâts consécutifs à une crue ont généralement été remblayées à l'aide de matériaux rapportés. Au regard des autres matériaux restés en place, leur nature et leur mise en œuvre diffèrent, ce dont la mesure de la résistivité apparente rend compte immédiatement. Par ailleurs, la présence d'**hétérogénéités transversales comme les réseaux enterrés traversants**, est aussi bien mise en évidence par les mesures Radio-MT, lorsqu'au moins deux profils sont réalisés en crête, côté fleuve et côté val.

La **modélisation** et l'**inversion** des mesures apportent une information qualitative complémentaire. Elles nécessitent cependant une connaissance *a priori* des grandeurs physiques du terrain, comme l'épaisseur de recouvrement de la première couche ou la nature et la profondeur approximative des anomalies. De plus, les effets topographiques du corps de digue sur le champ incident ne sont pas négligeables : une hétérogénéité dans l'ouvrage reçoit le champ depuis la crête mais aussi celui issu de la transmission du champ incident sur le talus. Tant que l'orientation de la digue par rapport au champ incident est constante, et tant que la pente du talus de digue est

constante et homogène au regard du champ incident, ce champ transmis crée une réponse uniforme en crête et le long de l'ouvrage. En revanche, une variation de la nature des matériaux du talus, une variation de la pente de talus ou un changement d'orientation de la digue par rapport au champ incident (sinuosité de la digue) modifiera la mesure en crête. À ce jour, **ce problème reste à étudier**.

La réalisation de sondages géotechniques s'avère indispensable pour compléter l'interprétation qualitative. L'analyse de ces sondages conduit à l'interprétation des profils en termes de nature, d'épaisseur de matériaux et de caractéristiques mécaniques.

4.2.8 Exemples de mesures

Les mesures Radio-MT suivantes ont été réalisées en 1999 et en 2004 (Hollier-Larousse, 2001a et 2001b ; Fauchard et Mériaux, 2004) sur la même digue que celle présentée pour les méthodes en champ proche : digue du fleuve Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque.

La figure 28 (Mériaux *et al.*, 2003) montre, à titre d'exemple, deux profils réalisés à 168 kHz côté val et côté Agly. Si on considère que la résistivité apparente est de l'ordre de $50 \Omega.m$, l'épaisseur de peau est de l'ordre de 9 m, et la profondeur de pénétration est de l'ordre de 4 à 5 m : à cette fréquence, c'est essentiellement la digue et le sommet de sa fondation qui sont auscultés, la hauteur des digues de l'Agly étant comprise entre 2 et 3,5 m.

Les moyennes des résistivités apparentes de chaque profil sont de 42 et $52 \Omega.m$ et témoignent de l'homogénéité globale du corps de la digue. Des anomalies locales très contrastées sont visibles côté val au niveau des **surverses** où les talus de la digue ont été reconstitués par des matériaux grossiers après la crue de 1999.

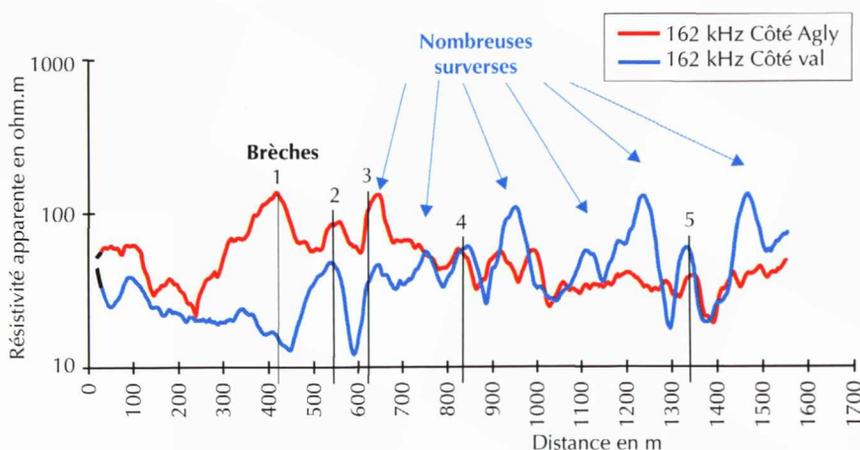


Figure 28 – Exemple de mesures Radio-MT sur les digues de l'Agly (Mériaux *et al.*, 2003)

La brèche connue apparaît nettement sur les deux profils. Des résistivités contrastées (20 et 60 $\Omega.m$), côté val et côté Agly, entre 250 et 750 m (de part et d'autre de la brèche) ne trouvent pas d'explication dans l'inspection visuelle. Elles sont peut-être la signature de travaux de profilage de la crête après la crue de 1992.

Enfin, des anomalies alignées sur les deux profils traduisent l'existence d'**hétérogénéités transversales** (traits verticaux numérotés pour les plus nettes d'entre elles). À part la brèche, il peut aussi s'agir de tranchées et/ou de conduites traversant le corps de la digue ou de limites de réparation de chaussées recouvertes par la couche de roulement.

Les courbes de la figure 28 ont été obtenues après lissage (avec une moyenne glissante sur 40 points espacés de 1 m). Pour obtenir de tels résultats, une grande expérience de la méthode et une synthèse des études préalables sont nécessaires.

Les mesures brutes sont, en revanche, plus délicates à interpréter et au moins trois profils pour un trajet donné, à une fréquence donnée, sont impératifs, comme cela est illustré sur la figure 29. La zone de brèche, repérée sur les figures précédentes, est ici plus particulièrement étudiée. Les quatre profils représentés, de 200 m de longueur, ont été réalisés à la vitesse de 5 km/h, avec un pas de mesure tous les 0,5 m environ. Ces profils (figure 29a), réalisés sur le même trajet côté fleuve, montrent une variabilité importante entre eux, sur des sections de quelques mètres de longueur. En revanche, des variations similaires, de dimensions décimétriques au minimum, se dégagent de l'ensemble des profils. Un lissage réalisé avec une moyenne glissante de 10 m (figure 29b), permet d'obtenir des corrélations plus évidentes et mène à une interprétation plus sûre. Deux anomalies à 470 et à 590 m sont bien localisées pour chacun des quatre profils, avec une précision métrique. Elles délimitent une zone plus résistante, consécutive aux travaux de réparation avec des matériaux graveleux.

Les mêmes mesures et traitements ont été menés côté val. Deux anomalies conductrices apparaissent nettement sur l'ensemble des profils, l'une à 490 m et l'autre à 550 m. Elles sont toutes deux situées dans la zone de brèche et correspondent probablement à la présence de canalisations ou aux limites de cette zone. On remarque, en revanche, une grande variabilité sur les 50 premiers mètres des profils (figure 30).

4.2.9 Conclusion

La méthode Radio-MT est une méthode à profondeur de pénétration optimale car les fréquences généralement disponibles permettent une auscultation de la digue et d'une partie de sa fondation, avec un pas de mesure de l'ordre du mètre. Son rendement peut être très grand dans le cas où le dispositif possède des capteurs capacitifs et dans le cas où la crête de digue est carrossable.

L'interprétation des résultats bruts est tout d'abord qualitative et permet de délimiter des zones plus ou moins résistantes, de dimensions décimétriques. La réalisation de plusieurs profils sur un même trajet montre, toutefois, une grande variabilité pour des sections de quelques mètres. Il est donc conseillé de réaliser au moins trois profils pour un même trajet, ce qui peut permettre de révéler des corrélations fortes,

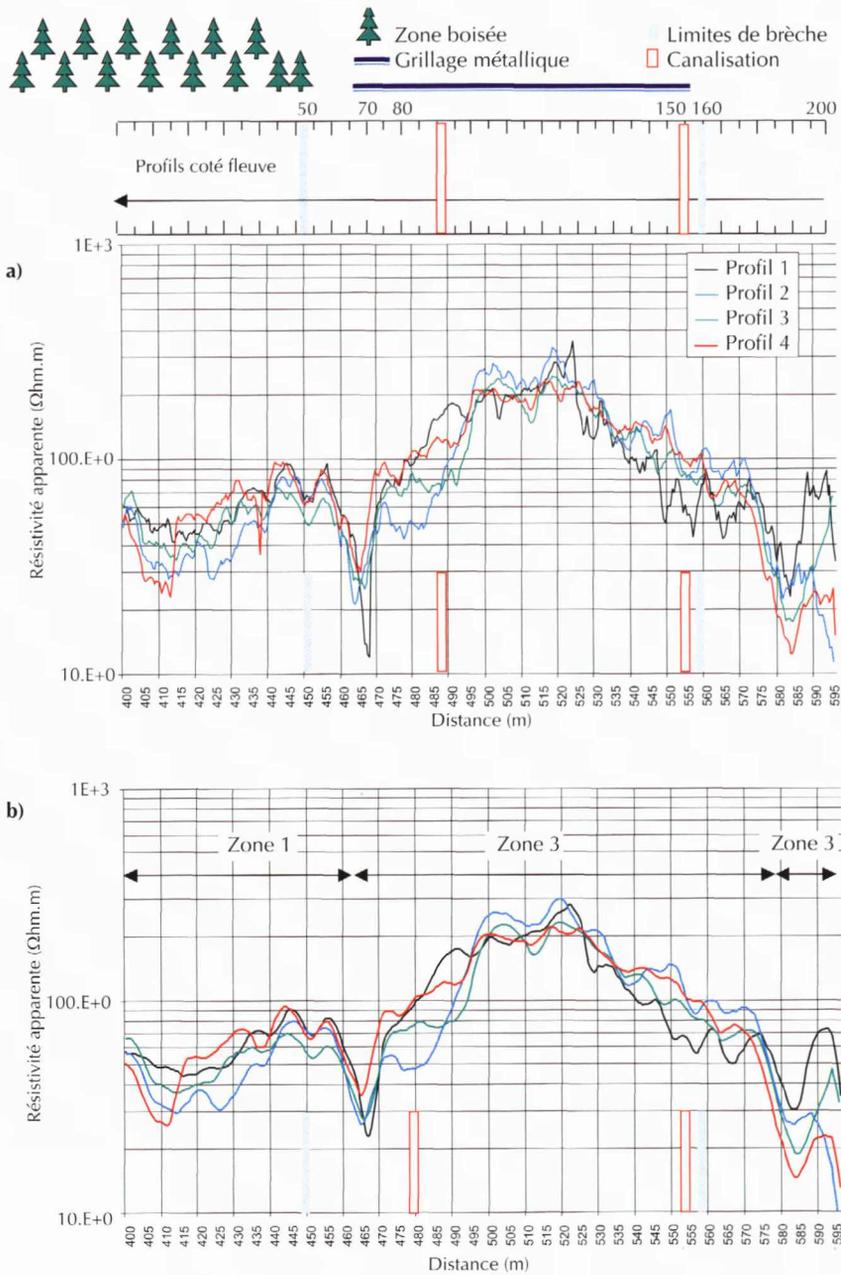


Figure 29 – Comparaison de quatre profils Radio-MT côté fleuve. a) profils bruts, b) profils filtrés

relatives à des anomalies ponctuelles positionnées au mètre près, et de confirmer les tendances générales des variations de résistivité de dimensions décamétriques. Cette variabilité traduit, d'une part, la grande sensibilité de la méthode aux hétérogénéités

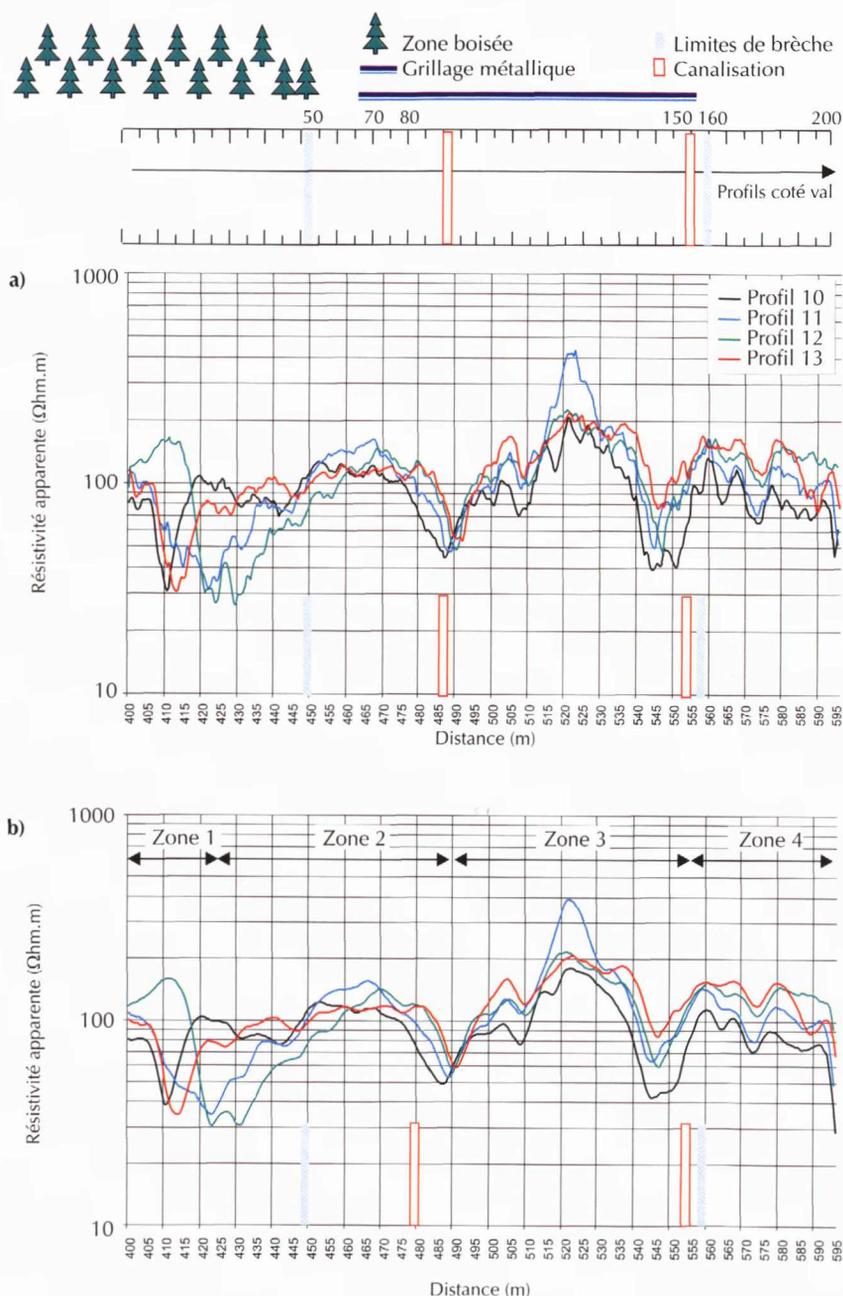


Figure 30 – Comparaison de quatre profils Radio-MT côté val. a) profils bruts, b) profils filtrés

de surface. D'autre part, les éventuels effets topographiques ne sont pas maîtrisés à ce jour. Enfin, l'utilisation d'électrodes capacitives est sujette à discussion. L'expérience montre qu'elles ont tendance à se « charger » en fonction du temps et qu'elles

sont sensibles à la variation de la rugosité du sol. Ces aspects suffisent à limiter aujourd'hui l'intérêt de la méthode pour le diagnostic des digues. Des améliorations seraient alors à mener sur le type de capteurs utilisés.

Les résultats des études préalables, en particulier ceux de l'inspection visuelle, doivent si possible être connus avant les mesures géophysiques. Ils rendent possible l'interprétation quantitative : les zones plus ou moins résistantes sont alors interprétées en zones plus ou moins hétérogènes. Les anciennes zones de surverse et de brèche sont en particulier bien révélées par la méthode.

Les méthodes VLF en mode inclinaison (VLF-EM ou VLF-Z) (McNeill J.-D. et Labson V.F., 1991), dont le principe est basé sur la mesure des composantes horizontales et verticales du champ magnétique total, ne sont pas présentées ici, car elles n'ont pas été testées. Mais le champ H reflétant essentiellement la présence de bons conducteurs, les méthodes en mode résistivité, type Radio-MT, restent *a priori* le bon choix.

4.3 Comparaison des méthodes électromagnétiques Slingram et Radio-MT à grand rendement sur les digues à sec

4.3.1 Le rendement des méthodes

La mise en œuvre de dispositif tractable en méthode Slingram a montré que cette technique peut avoir un grand rendement. Le dispositif testé montre un faible encombrement (longueur de 4 m environ) et offre une profondeur d'investigation d'environ 6 m. Il reste cependant à élaborer des appareils nécessairement plus encombrants, permettant d'investir des profondeurs d'au moins 10 m, ou des appareils avec une boucle émettrice et plusieurs boucles réceptrices à des écartements variables permettant d'atteindre plusieurs profondeurs.

La méthode Radio-MT est *a priori* la méthode qui offre le plus grand rendement sur les digues carrossables. La sensibilité de la méthode aux hétérogénéités de surface et la sensibilité des capteurs capacitifs imposent cependant de réaliser au moins trois profils pour un même trajet, ce qui divise le rendement au moins par trois. Ce dernier aspect paraît constituer un critère suffisant pour écarter la méthode de la problématique du diagnostic des digues. L'avenir de la Radio-MT passerait par des développements permettant en particulier de s'affranchir des problèmes relatifs au tapis capacitif.

4.3.2 La profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation des méthodes Slingram dépend essentiellement de l'orientation des bobines d'induction par rapport au sol et de la distance qui les sépare. Un grand nombre de dispositifs permettent là aussi, d'atteindre facilement les profondeurs visées.

La profondeur d'investigation en Radio-MT dépend de la fréquence et de la résistivité des matériaux rencontrés. Un nombre suffisant d'émetteurs disponibles entre 15 kHz et 1 MHz permet d'atteindre aisément les corps de digue et une partie de leur fondation.

4.3.3 La répétitivité des mesures

La méthode Radio-MT a montré une bonne répétitivité sur des chaussées (Chevassu *et al.*, 1990). En revanche, sur les digues, une grande variabilité des mesures est constatée pour des profils réalisés sur le même trajet et seulement à quelques minutes d'intervalle. La réalisation d'au moins trois profils est alors nécessaire pour interpréter les résultats plus sûrement.

La méthode Slingram montre une très bonne répétitivité des mesures, même en comparant un profil pédestre et un profil tracté.

4.3.4 Les corrélations entre les deux types de mesure

La méthode Radio-MT permet d'obtenir la résistivité apparente des matériaux par la mesure du champ électromagnétique rétrodiffusé par le sous-sol. Elle est sensible à la fois à la présence de matériaux conducteurs et de matériaux résistants.

La méthode Slingram permet d'obtenir la conductivité apparente, ou son inverse, la résistivité apparente. Elle est plus sensible à la présence de matériaux conducteurs que de matériaux résistants.

Des mesures comparatives (figure 31)^{*} ont montré que les deux méthodes donnent des résultats similaires lorsque la profondeur de pénétration est équivalente. En revanche, sur les digues de l'Agly (figure 32)^{**}, la comparaison des deux méthodes montre que l'on retrouve l'ancienne zone de brèche, que d'autres pics de résistivité se retrouvent sur les deux profils de mesure Slingram et Radio-MT mais que les mesures Radio-MT révèlent d'autres hétérogénéités résistantes auxquelles la méthode Slingram est moins sensible. Les deux méthodes sont donc complémentaires. Les deux profils Radio-MT de la figure 32, réalisés à la même fréquence sur le même trajet, montrent aussi sur certaines zones une grande variabilité, due majoritairement à la sensibilité de la méthode aux hétérogénéités de surface. Il apparaît là encore évident que plusieurs profils Radio-MT sont nécessaires pour établir une mesure moyenne pour un trajet donné.

Enfin, il faut accorder, tant pour la méthode Slingram que pour la méthode Radio-MT, une importance relative aux valeurs de résistivité, car les deux méthodes intègrent la mesure d'un volume de terrain hétérogène.

* p.63 ** p.64

4.4 Autre reconnaissance à grand rendement : le radar géologique

Cette méthode n'est pas prioritairement retenue pour la reconnaissance de digue depuis la crête. Elle est cependant présentée car elle peut être utilisée en pied de

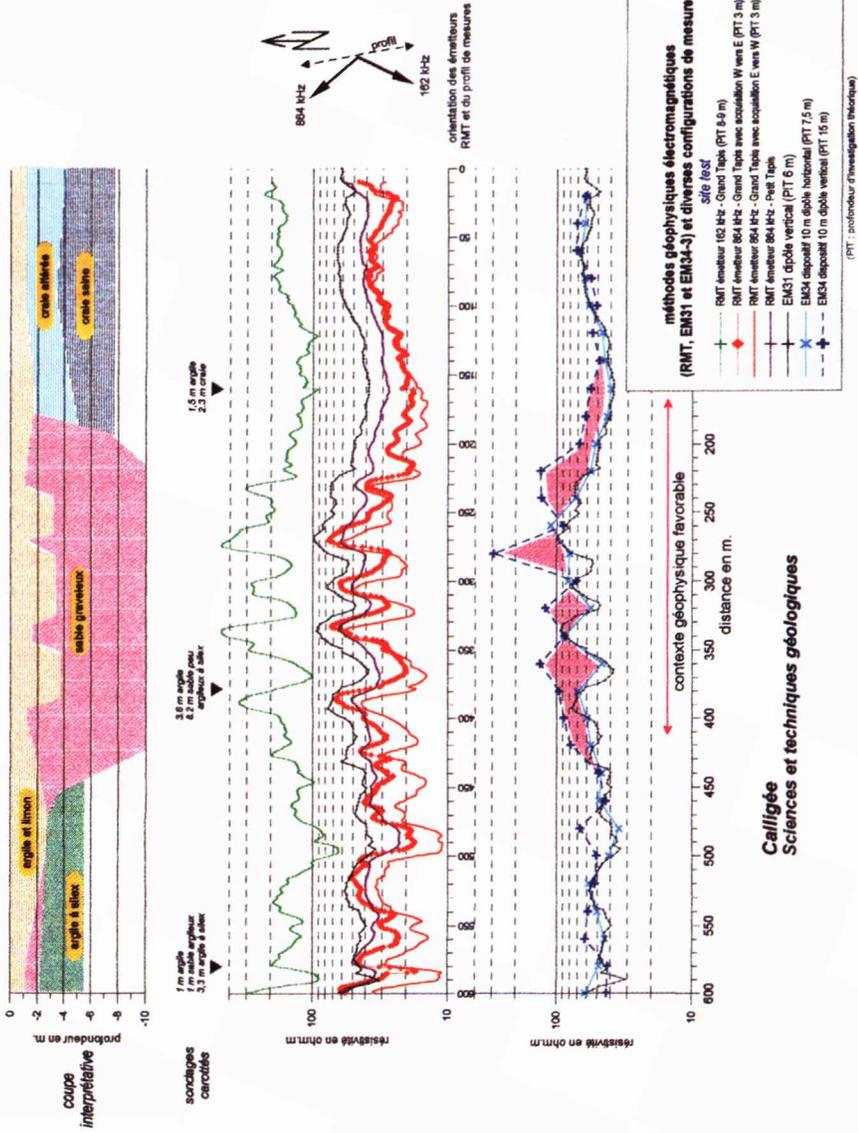


Figure 31 – Mesures comparatives entre méthode Radio-MT et méthode Slingram

digue pour l'étude des terrains de la fondation. Elle peut aussi trouver des applications sur certaines parties de digues à sec (résistivité supérieure à 100 $\Omega.m$) à hauteur limitée (moins de 5 m) comme, par exemple, une recharge de matériaux grossiers ou une structure de chaussée.

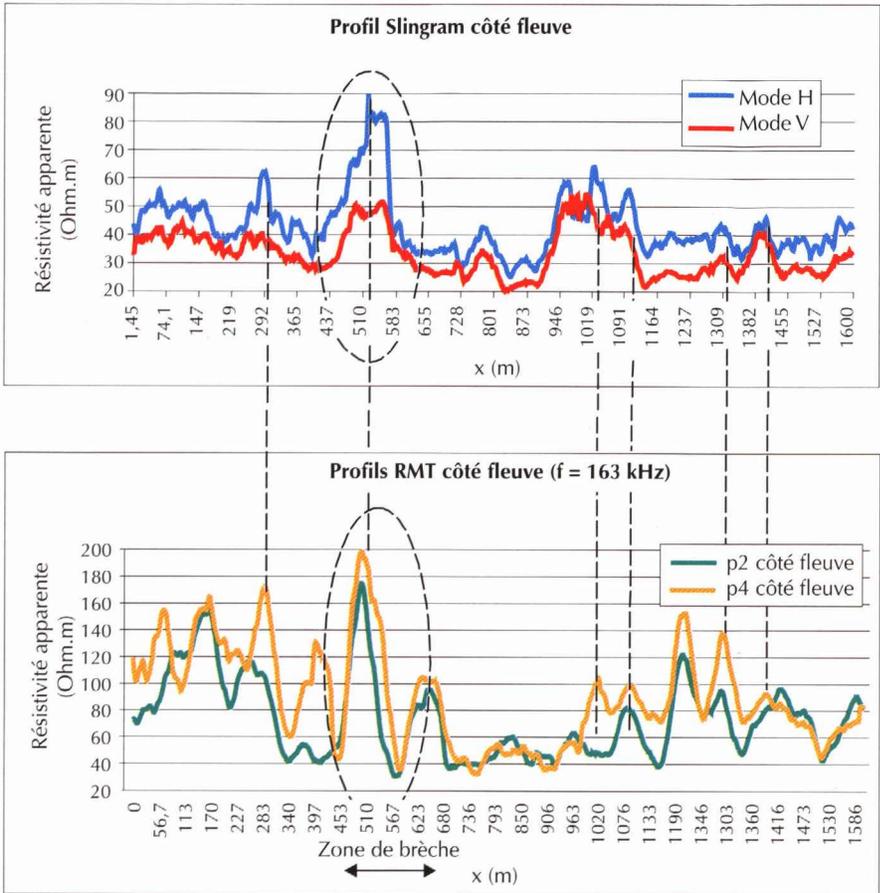


Figure 32 – Comparaison des mesures Radio-MT et Slingram sur la digue de l'Agly

4.4.1 Principe

Les méthodes de reconnaissance radar (Daniels *et al.*, 1988 ; Daniels, 1996 ; Davis et Annan, 1989) sont basées sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol, dans une bande de fréquence de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Ces ondes sont émises sous forme d'impulsions temporelles de très courte durée, en un point de la surface par une antenne émettrice. Elles interagissent avec la matière lorsqu'elles rencontrent un contraste de permittivité électromagnétique, se réfléchissent partiellement vers la surface où leurs caractéristiques sont mesurées par une antenne et sont analysées pour en déduire les propriétés du sous-sol (figure 33). En mode monostatique, une antenne fait office de récepteur et d'émetteur. En mode bistatique, il y a une antenne émettrice et une antenne réceptrice. Des dispositifs avec un plus grand nombre d'antennes sont envisageables (mode multistatique).

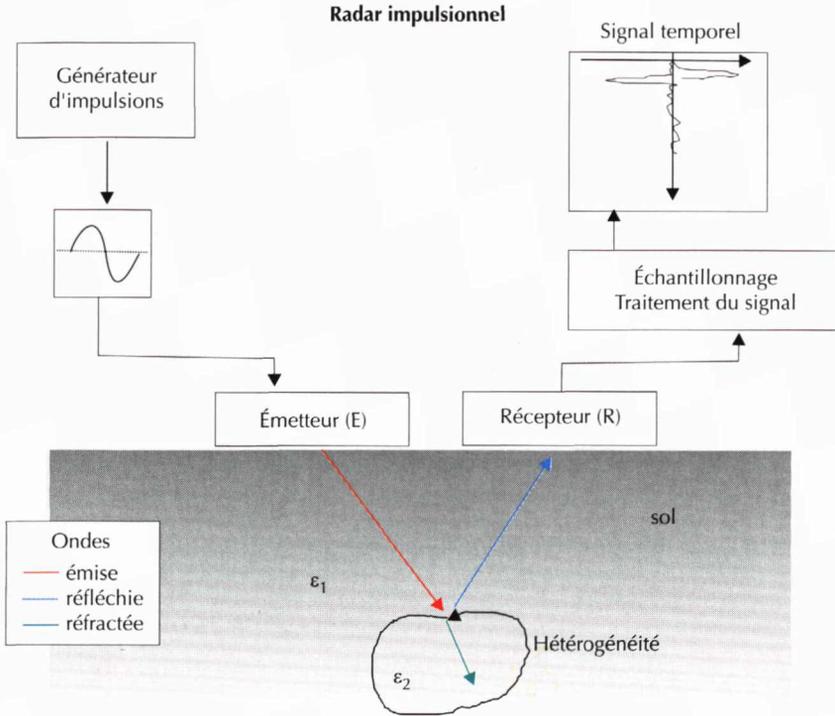


Figure 33 – Principe du radar géologique

La grandeur mesurée est un signal qui représente les variations d'amplitude du champ électrique mesuré en fonction du temps de propagation des ondes dans le terrain (mesuré en nanosecondes).

4.4.2 Résultats attendus

Le premier résultat attendu s'appelle un **radargramme brut**, ou coupe-temps : l'amplitude de chaque signal est graduée en niveaux de couleurs, et les signaux sont juxtaposés en fonction de leur position en surface.

Le deuxième résultat attendu est le **radargramme interprété** : la connaissance des vitesses dans le milieu permet de représenter les signaux en fonction de la profondeur (m). La juxtaposition de plusieurs radargrammes (figure 34) permet aussi de visualiser les mesures en trois dimensions (surface auscultée en coordonnées horizontales et profondeur en coordonnées verticales), par des coupes en plan à une profondeur donnée ou selon un profil donné.

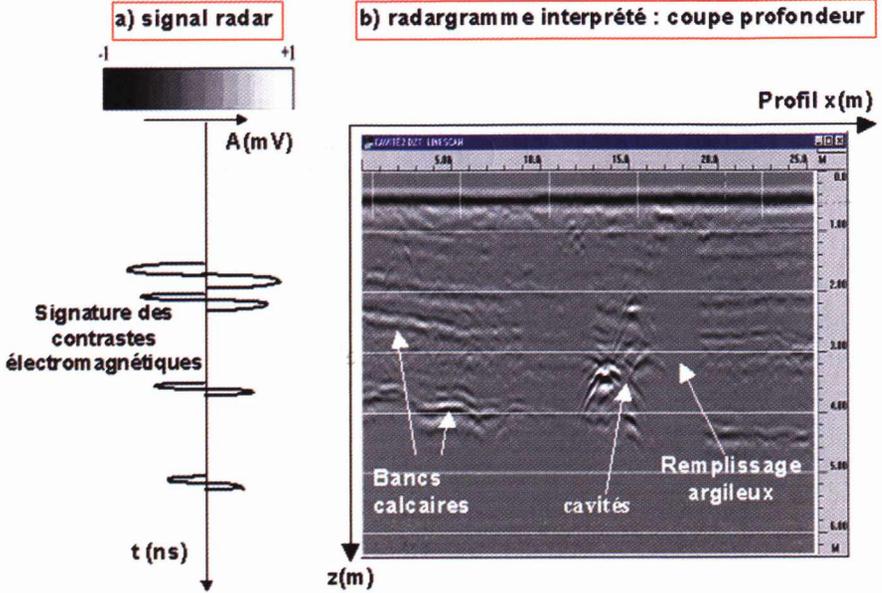


Figure 34 - a) Signal radar, b) exemple de radargramme interprété réalisé à une fréquence centrale $f_c = 200$ MHz (Doc. LRPC Saint-Brieuc)

Pour interpréter les radargrammes bruts sur une digue, il faut pouvoir déterminer les vitesses des ondes dans les matériaux qu'elles traversent. Dans l'hypothèse du champ lointain, à une fréquence particulière, une onde électromagnétique issue de l'antenne émettrice est une onde plane en régime harmonique dont la représentation des champs électrique et magnétique dans l'espace est donnée sur la figure 35.

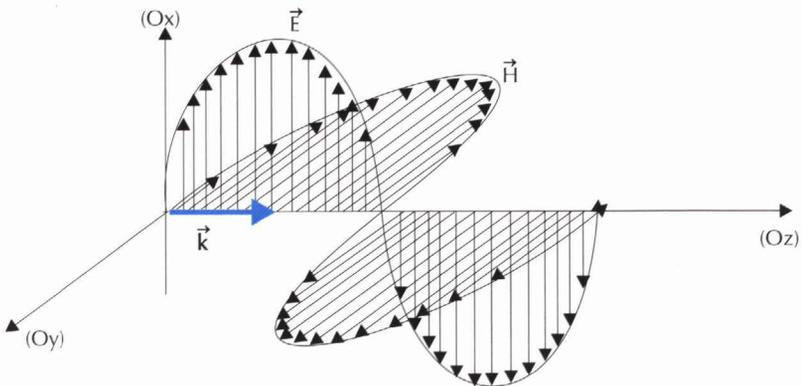


Figure 35 - Représentation en régime harmonique des champs électrique et magnétique suivant le vecteur \vec{k} , vecteur de propagation, ici dirigé suivant (Oz)

L'onde est plane si tous les points d'un plan perpendiculaire à la direction de propagation sont soumis à des champs égaux en amplitude et en phase. Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} sont, dans le plan d'onde, perpendiculaires à la direction de propagation (Oz).

Pour une onde monochromatique de fréquence angulaire ω se propageant selon un axe (Oz), polarisée selon un axe (Ox) de vecteur unitaire \vec{j} , dans un milieu de permittivité effective $\varepsilon_e = \varepsilon'_e - j\varepsilon''_e$, (où $\varepsilon'_e = \varepsilon' + \sigma''/\omega$ et $\varepsilon''_e = \varepsilon'' + \sigma'/\omega$, où ε' et ε'' sont les parties réelle et imaginaire de la permittivité et où σ' et σ'' sont les parties réelle et imaginaire de la conductivité), la solution générale de l'équation de Helmholtz s'écrit :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 e^{-jkz} e^{j\omega t} \vec{j}$$

avec k le nombre d'ondes défini par :

$$k = \beta - j\alpha$$

où α est le coefficient d'atténuation de l'onde et β le coefficient de phase.

Pour connaître les vitesses dans le milieu, il faut évaluer la permittivité et la conductivité. La plupart des terrains rencontrés étant non magnétiques, la perméabilité magnétique est égale à celle du vide.

Dans de nombreux cas traités en géophysique, les milieux sont considérés non dispersifs (ε_e indépendant de la fréquence), dans lesquels les phénomènes de propagation dominant et où les pertes sont faibles ($\varepsilon_e = \varepsilon' = \varepsilon'_0$), **ce qui est le cas en surface (type chaussée) des corps de digue circulables.**

Si les phénomènes de conduction apparaissent, **les pertes dans le milieu seront plus importantes, ce qui est majoritairement le cas dans les corps de digue.** Les caractéristiques pour un milieu à faibles pertes et un milieu à pertes sont résumées dans le tableau 3 page suivante.

4.4.3 Modélisation

La modélisation de la propagation des ondes radar peut aider à l'interprétation des mesures. Il existe plusieurs méthodes dont les plus courantes sont la méthode des moments et la méthode FDTD (*Finite Difference Time Domain*). Par ailleurs, il existe de nombreux logiciels disponibles sur le marché, proposés par les professionnels et les universitaires de la géophysique. Ils permettent de créer rapidement un modèle du milieu ausculté.

4.4.4 Méthodologie – Déroulement d'une campagne de mesure

L'auscultation sur les digues est généralement limitée à la proche surface. On met ainsi bien en évidence les contrastes de matériaux plutôt graveleux et résistants. C'est une méthode à très grand rendement (plusieurs kilomètres à quelques dizaines de kilomètres par jour). Suivant les matériels et les conditions, le dispositif peut être porté par l'opérateur ou tracté par un véhicule.

Milieu	Faible pertes (surface de digue type chaussée, recharge drainante) <i>(α'' et ϵ'' négligeables)</i>	À pertes (corps de digue, de constitution limoneuse, argileuse) <i>(α'' négligeable)</i>
vitesse v (m.s ⁻¹)	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}}$	$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\frac{\epsilon'_r}{2} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}}}$
coefficient d'atténuation α (Np.m ⁻¹) et coefficient de phase β (rad. m ⁻¹)	$\alpha = \frac{60\pi \sigma'}{\sqrt{\epsilon'_r}}$ $\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'_r}$	$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\left(\frac{\epsilon'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)\right)}$ $\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\left(\frac{\epsilon'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)\right)}$
angle de perte $\tan \delta$	$\tan \delta = \frac{\sigma'}{\omega \epsilon'_r}$	$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r + \frac{\sigma'}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon'_r} = \frac{\epsilon''_e}{\epsilon'_e}$
profondeur de pénétration d (m) <i>($\rho = 1/\sigma'$)</i>	$d = \frac{\sqrt{\epsilon'_r}}{60\pi \sigma'} = \frac{\rho \sqrt{\epsilon'_r}}{60\pi}$	$d = \frac{1}{\alpha} = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}}$

Tableau 3 – Formules de quelques grandeurs caractéristiques pour les milieux à pertes et à faibles pertes

Mais au-delà de 2 à 3 m de profondeur, les données radar ne sont plus significatives : les matériaux constituant le corps de digue sont généralement plutôt conducteurs (< 100 Ω.m), les ondes radar ne pénètrent plus le matériau, elles sont absorbées par le milieu.

La **maille de mesure** entre profil dépend du niveau de détail souhaité. Il est de l'ordre de 2 à 5 m, ou plus suivant les applications visées et la taille de la zone de prospection.

Le **choix de la fréquence centrale** d'auscultation est important. Il est lié à l'antenne et se fait, d'une part, en fonction de sa bande passante de fonctionnement : il faut que les longueurs d'ondes utilisées soient de l'ordre de la dimension de la cible et que la bande passante soit large pour avoir une bonne résolution temporelle. Il se fait, d'autre part, en fonction de la nature du terrain hôte et de la profondeur d'investigation visée, rarement au-delà d'une vingtaine de mètres dans des terrains plutôt résistants, supérieurs à 100 Ω.m environ.

Le **temps d'enregistrement des signaux** est fixé en fonction des informations recueillies lors de la recherche d'indices. Si l'on connaît approximativement la vitesse des ondes dans le sol et la profondeur des cibles recherchées, alors on déduit le

temps de propagation des ondes jusqu'à la cible. Le temps d'enregistrement est le temps double, correspondant au trajet aller et retour des ondes.

Ensuite, l'utilisateur doit ajuster un **pas d'enregistrement des signaux**. Il peut se régler suivant une roue codeuse, qui déclenchera une acquisition à un pas de distance donné. L'acquisition peut aussi se faire en continu. Dans ce cas, l'utilisateur doit marcher à vitesse constante, et signaler régulièrement le long du profil des points dont les coordonnées sont connues.

D'autres paramètres peuvent être réglés :

- le **stacking** : c'est un paramètre qui permet de sommer plusieurs signaux correspondant à un même point, afin d'améliorer le rapport signal sur bruit ;
- le **gain** : les radars commerciaux proposent généralement la possibilité d'appliquer des gains permettant d'amplifier le signal en fonction du temps d'écoute ;
- les **filtres** : il est généralement possible d'appliquer des filtres passe-bande dès l'acquisition. Si c'est le cas, il est préférable de connaître leurs caractéristiques, afin de bien en tenir compte dans les traitements après l'acquisition.

Enfin, comme pour toutes les méthodes, un **relevé de la topographie**, lorsque les mesures sont faites directement sur la surface, est utile pour recalculer les signaux par rapport à l'origine. Il faut tenir compte des structures environnantes, comme les lignes haute tension, les bâtiments contenant des parois métalliques, les câbles enterrés, les émetteurs radio..., qui, suivant la qualité du blindage des antennes, génèrent des réflexions dans les signaux enregistrés et peuvent mener à des erreurs d'interprétation.

4.4.5 Quelques caractéristiques des matériels de mesure

Le **radar impulsionnel** (ou radar géologique) est un appareil qui émet, reçoit et enregistre des signaux électromagnétiques. Les signaux émis sont des signaux temporels (impulsions) d'une période de l'ordre de la nanoseconde (application type chaussées ou recherche d'aciés dans les bétons) à quelques dizaines de nanosecondes (applications géologiques). La fréquence de répétition des signaux peut atteindre plusieurs centaines de kHz. Les signaux réfléchis (*scan* en anglais) sont enregistrés sur une fenêtre temporelle. Les radars récents enregistrent plusieurs centaines de signaux par seconde, avec une résolution temporelle de l'ordre de 5 picosecondes. La dynamique des radars est de l'ordre de 110 dB. Ces matériels traitent en temps réel les signaux reçus (filtres passe-bande et sommation des signaux). Ils se présentent physiquement sous la forme d'un boîtier, et d'un écran séparé ou non, permettant la lecture en temps réel des signaux mesurés.

Les **antennes** d'émission et de réception des radars géologiques sont très diversifiées et, pour une même application, de multiples dispositifs peuvent être déployés. Les caractéristiques de ces antennes, leur fonctionnement et leur rayonnement électromagnétique sont des parties importantes que l'on peut consulter par exemple, dans les références suivantes : Combes, 1996 et Eyraud *et al.*, 1973. Les antennes sont

généralement des dipôles cylindriques pour les applications basse fréquence, des dipôles bi-triangle (antennes « papillon ») pour les applications intermédiaires et certaines applications haute fréquence, et des cornets pour des applications type chaussées.

À l'exception des antennes cornets, les antennes utilisées en radar fonctionnent en contact au sol, ou à quelques centimètres du sol, ce qui par ailleurs pose des problèmes en ce qui concerne la connaissance de leur diagramme de rayonnement dans des terrains que l'on cherche à caractériser. Elles possèdent le plus souvent un blindage afin de se protéger des bruits électromagnétiques provenant d'au-dessus du sol.

Elles sont caractérisées par :

- une **fréquence centrale de rayonnement**, c'est-à-dire la fréquence pour laquelle l'énergie émise est maximale ;
- une **bande passante** qui est la plage de fréquence exploitable autour de la fréquence centrale ;
- un **diagramme de rayonnement** qui représente la répartition de l'énergie rayonnée autour de la direction principale de rayonnement ;
- une **ouverture à mi-puissance (- 3dB)** qui est l'angle dans l'un des plans (plan E ou H) de polarisation autour de la direction principale, qui définit la zone où la puissance émise est la moitié de la puissance maximale.

4.4.6 Interprétation des mesures

Les **mesures brutes** apportent une **information qualitative** qui permet de localiser directement les anomalies dans le sol par la visualisation d'un contraste ou d'une atténuation dans le signal enregistré. Lorsque les vitesses ne sont pas connues, des sondages géotechniques permettront de caractériser la structure du sol en termes de permittivité et de profondeur.

Plus les fréquences des ondes électromagnétiques seront élevées, meilleure sera la résolution et moins grande sera la profondeur de pénétration des ondes. À l'opposé, plus basses seront les fréquences utilisées, plus grande sera la profondeur de pénétration mais moins bonne sera la résolution.

Si les vitesses dans le sol sont connues, une **interprétation quantitative** des radargrammes peut être faite en termes de profondeur. Les dimensions des anomalies peuvent être aussi évaluées en déterminant la **résolution verticale** que l'on estime comme le quart de la longueur d'onde correspondant à la fréquence centrale dans

le matériau, $r_v = \lambda / 4 = \frac{1}{4} \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f_c}$ (m) et la **résolution horizontale** est définie pour

une profondeur z par : $r_h \approx \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda z}{2}}$ (m). Quel que soit le résultat d'une interprétation

quantitative, il est recommandé de faire une campagne de sondages géotechniques au droit des anomalies.

4.4.7 Exemple de résultats

La zone de brèche sur la digue de l'Agly présentée pour les mesures Slingram et Radio-MT a été auscultée au radar géologique (Mériaux *et al.*, 2003). Trois profils radar ont été réalisés par deux opérateurs, en une journée de terrain, dans le secteur de la brèche de Saint-Laurent (de part et d'autre de la chaussée ainsi qu'au centre) et complétés par quinze profils transversaux. Le radar utilisé était un modèle SIR-10A+ de marque GSSI, avec antenne de 500 MHz. La brèche réparée se repère parfaitement par la présence de nombreux points diffractants (figure 36). Des matériaux de structures de chaussées (sur le premier mètre) plus absorbants en aval de la brèche qu'en amont sont, par ailleurs, mis en évidence.

On notera que, selon les figures 28 et 18, la brèche de Saint-Laurent apparaît comme une anomalie résistante. Elle a été en effet comblée à l'aide de matériaux plutôt grossiers et résistants. Cette zone est donc *a priori* plus perméable aux ondes radar que le reste du corps de digue, ce que l'on vérifie sur la figure 36.

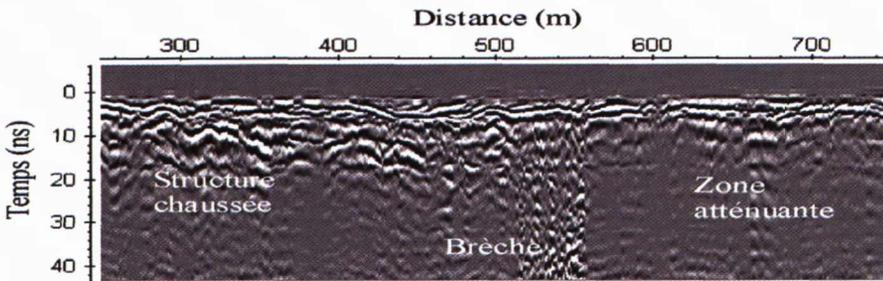


Figure 36 – Radargramme avec mise en évidence de la brèche, réalisé à 500 MHz dans l'axe de la chaussée (Mériaux *et al.*, 2003)

4.4.8 Conclusion

La méthode radar est une méthode à grand rendement mais dont **l'efficacité est faible pour le diagnostic des digues**. En effet, les ondes radar ne pénètrent pas les matériaux conducteurs (limons, argiles...) qui composent la majorité des corps de digue. Aussi, la profondeur de pénétration est-elle généralement limitée aux deux premiers mètres en crête de digue, en particulier si celle-ci comporte une chaussée. La méthode n'est cependant pas à condamner définitivement pour cette application : certaines configurations peuvent se prêter au radar (hauteur de digue inférieure à 5 m et corps d'ouvrage plutôt résistant ($> 100 \Omega.m$), ou parties de digue résistantes telles que brèche réparée par des matériaux grossiers (structure de chaussée, recharge drainante...). Elle permet, par ailleurs, d'obtenir aisément des profils transversaux, avec les réserves énoncées plus haut.

4.5 Reconnaissance locale avec le panneau électrique

Cette phase peut venir en complément des mesures à grand rendement, ou bien à la suite des essais géotechniques. La méthode présentée, le panneau électrique, est particulièrement efficace pour imager ponctuellement une tranche transversale ou longitudinale de la digue. Elle permet d'obtenir une carte de la distribution des hétérogénéités (par la mesure de leur résistivité) en fonction d'une profondeur approchée, alors que les méthodes à grand rendement ne donnent qu'un profil relatif à une distribution globale des matériaux dans le corps de digue, sans avoir de réelle précision sur les profondeurs.

4.5.1 Principe des méthodes électriques

Les méthodes de prospection électrique par courant continu consistent à déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité ρ ($\Omega.m$). Le principe de mesure est le suivant : un courant continu I est injecté dans le sol par deux électrodes notées A et B. La différence de potentiel V est mesurée aux bornes de deux autres électrodes notées M et N (figure 37).

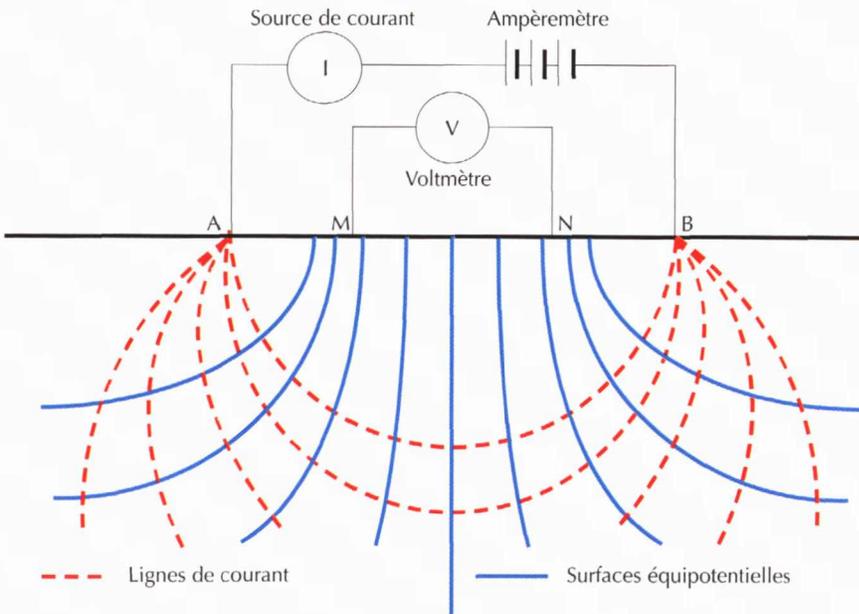


Figure 37 - Principe de la prospection électrique par courant continu

La résistivité apparente est « le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité $1 \Omega.m$ ». Cette grandeur a les dimensions d'une résistivité. On démontre qu'elle vaut :

$$\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I}$$

où k , le facteur géométrique, est défini par :

$$k = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$$

Les principaux dispositifs sont présentés sur la figure 38. Ce sont tous des quadripôles. Les plus couramment utilisés sont les dispositifs Wenner (alpha et bêta), Schlumberger, le dipôle-dipôle, le pôle-pôle et, de plus en plus, le pôle-dipôle en panneau. Leur profondeur d'investigation est une fonction croissante de la distance AM . Pour tous les dispositifs, cette distance est définie comme la plus petite entre l'électrode d'injection et l'électrode de potentiel. Si on prend comme référence cette distance AM , tous les dispositifs ont une profondeur d'investigation équivalente. Des auteurs comme Militzer *et al.* (1979) et Roy et Apparao (1971) ont étudié plus précisément les profondeurs d'investigation en fonction des dispositifs. Dans une première approximation, on peut considérer que la profondeur investiguée est de l'ordre de $1/6^e$ à $1/8^e$ de la longueur du dispositif.

Il y a trois types de mise en œuvre de la prospection électrique par courant continu depuis la surface :

- le **sondage électrique** : en un point fixe en surface, les électrodes sont écartées ;
- le **trainé électrique** : le dispositif est déplacé le long d'un profil. Les distances entre les électrodes sont fixes ;
- le **panneau électrique** qui est la combinaison des deux méthodes précédentes.

La méthodologie est décrite pour le panneau électrique et vaut pour les deux autres mises en œuvre.

a) LE SONDAGE ÉLECTRIQUE

Dans le dispositif du sondage électrique, le centre est fixe et les électrodes sont écartées pour mesurer la résistivité apparente en fonction de la longueur du dispositif. Ce principe est illustré sur la figure 39 pour un dispositif Wenner pour lequel les distances entre électrodes des points A, B, M et N varient d'un nombre entier de fois l'écartement initial a .

La **grandeur mesurée** est la résistivité apparente du sol au droit du centre du dispositif : le sondage électrique renseigne sur les variations verticales de la résistivité du terrain. La profondeur d'investigation dépend de la longueur finale des mesures et de la résistivité du sous-sol.

Le **résultat attendu** est une courbe logarithmique représentant la résistivité apparente ($\Omega.m$) en fonction de la distance entre électrodes d'injection (exprimée généralement en mètres, figure 39).

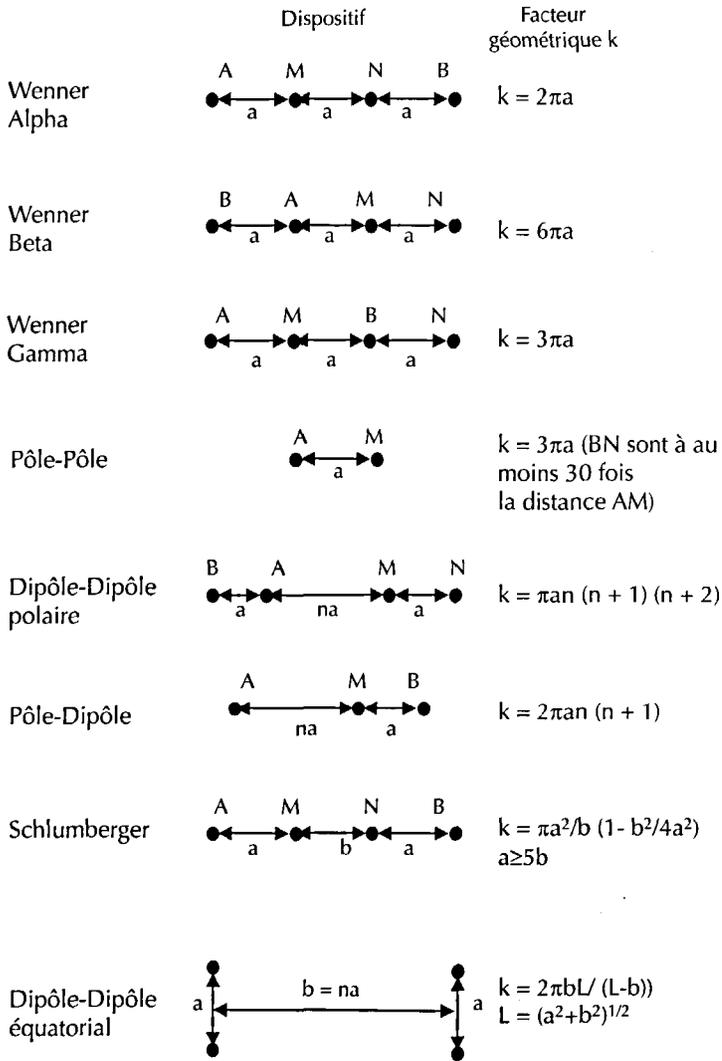


Figure 38 - Dispositifs et facteurs géométriques associés (Loke, 2002)

Pour les milieux tabulaires, l'interprétation des résultats se fait en termes d'épaisseurs et de résistivités de couches. On utilisait des abaques sur lesquels sont représentées les résistivités apparentes de milieu multicouche (Parasnis, 1986). On a recours aujourd'hui à des logiciels d'interprétation automatique assistée par ordinateur. L'interprétation n'est pas unique à cause des lois de similitude.

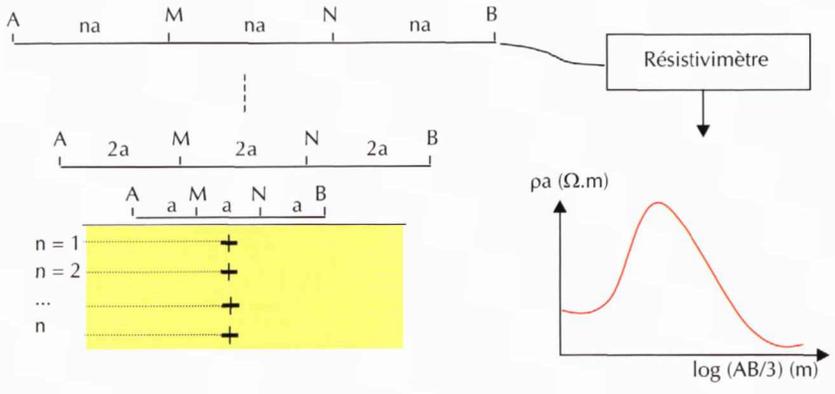


Figure 39 – Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner

b) LE TRAÎNÉ ÉLECTRIQUE

Le traîné électrique consiste à conduire les mesures pour un dispositif aux dimensions fixes le long d'un profil dirigé dans l'alignement des électrodes. Le principe est illustré sur la figure 40.

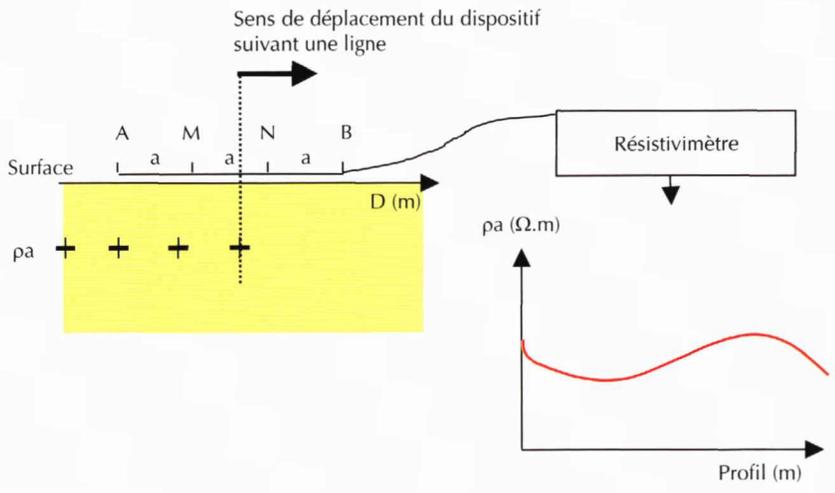


Figure 40 – Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner

La **grandeur mesurée** est la résistivité apparente du sol pour une longueur de dispositif donnée. La profondeur d'investigation dépend de cette longueur mais aussi de la résistivité du sous-sol. Ce dispositif est particulièrement sensible aux variations latérales de résistivité. La profondeur d'investigation dépend des dimensions du dispositif. La réalisation de plusieurs profils permet d'obtenir des cartes de résistivité apparente.

Le **résultat** d'un trainé de résistivité est une courbe semi-logarithmique représentant la résistivité apparente (en $\Omega.m$) du terrain en fonction de la position du dispositif de mesure le long du profil (en mètres) (figure 40).

4.5.2 Le panneau électrique

a) PRINCIPE

Cette méthode combine le trainé électrique et le sondage électrique. Elle consiste à implanter un grand nombre d'électrodes à intervalle constant le long d'un profil rectiligne (cas 2D) ou sur une grille (cas 3D). Toutes les électrodes sont reliées à un dispositif de mesure de potentiel et d'injection de courant. Le système (l'injection de courant et la mesure du potentiel) est piloté par ordinateur. Les électrodes jouent alternativement le rôle d'électrodes d'injection et de mesure du potentiel. On réalise automatiquement pour un quadripôle de longueur donnée un trainé électrique, et on fait varier la longueur du quadripôle pour réaliser les mesures pour toutes les longueurs possibles du dispositif.

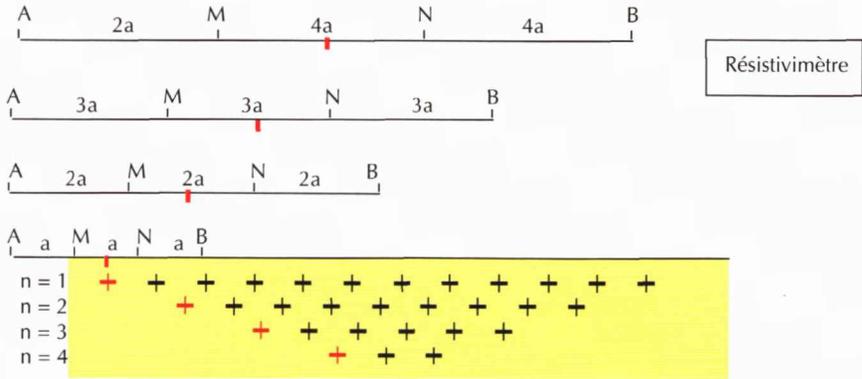


Figure 41 – Principe du panneau électrique

b) RÉSULTAT ATTENDU

Le **résultat brut attendu** d'une mesure en panneau électrique est une carte de résistivité apparente ($\Omega.m$), souvent appelée pseudo-section. L'abscisse représente la position du centre du dispositif (en mètres) le long du profil. L'ordonnée représente la longueur du dispositif (en mètres). Ce résultat n'est pas la représentation réelle d'une coupe de terrain : pour une ordonnée donnée, c'est-à-dire pour une longueur de dispositif donnée, c'est la résistivité apparente qui est représentée le long du profil, l'hétérogénéité correspondante étant située dans le demi-volume délimité par la surface. L'interprétation du résultat brut est délicate et nécessite une grande expérience.

Après traitement des mesures, le résultat attendu est une **carte de résistivité inversée** ($\Omega.m$). Il existe des logiciels qui permettent de réaliser l'inversion des mesures

en termes de variation de la résistivité interprétée en fonction de la position du dispositif et de la profondeur. Ces logiciels sont fondés sur l'hypothèse de la répartition à deux dimensions des résistivités des matériaux qui constituent le sous-sol, alors que la méthode intègre tout le demi-volume situé sous le dispositif. Ainsi une hétérogénéité constatée sur les résultats inversés peut très bien avoir pour origine une anomalie en surface, et non pas en profondeur. Il faut donc garder un regard critique sur les résultats des inversions.

La modélisation montre que des hétérogénéités superficielles et petites peuvent masquer des structures profondes et grandes. Les mesures présentent aussi un bruit d'origine géologique dont l'amplitude peut être forte. Cette méthode est cependant riche d'informations pour affiner le modèle de la structure interne de la digue (stratification, pendage, faille).

c) MÉTHODOLOGIE

Il faut vérifier que la résistivité apparente mesurée varie avec la longueur de ligne (sondage électrique). Ce test permet d'ajuster les longueurs des dispositifs qui doivent être de l'ordre de six à huit fois la profondeur d'investigation visée. Une modélisation peut aider à fixer les paramètres du dispositif. Pour les profondeurs inférieures à 20 m, le dispositif pôle-pôle est bien indiqué. Seules les électrodes A (de courant) et M (de potentiel) sont mobiles, les électrodes B et N sont à une distance de plus de vingt fois AM et doivent se trouver suivant un angle de 30° par rapport à l'axe AM. Le dispositif quadripôle symétrique est utilisé pour de plus grandes profondeurs, de même que le dispositif pôle-dipôle. Le dispositif dipôle-dipôle est souvent utilisé pour le panneau mais peut conduire à des résultats difficiles à interpréter, car il est très sensible aux à-coups de prises (très bruité).

Pour s'affranchir des difficultés d'interprétation liées à la localisation 3D des hétérogénéités, on peut réaliser plusieurs profils parallèles (transversaux ou longitudinaux). Un relevé topographique disponible est nécessaire pour le traitement des mesures transversales.

Les paramètres du dispositif doivent être maintenus aussi constants que possible (Code de bonne pratique AGAP, cf. bibliographie). En particulier, dans le cas d'un dispositif rectiligne, il ne faut pas dévier de plus de 10 degrés en direction du profil de référence. La variation des distances entre électrodes doit permettre de réaliser au moins cinq mesures par décade. La distance entre électrodes doit être connue à 5 % près. Enfin, la mesure du rapport V/I doit être connue à 3 % près, et celle de la différence de potentiel entre les électrodes V doit être supérieure à 0,5 mV, cette dernière étant particulièrement sensible aux phénomènes de polarisation des électrodes et des courants présents dans le sol (courants telluriques).

d) INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats bruts sont en général délicats à interpréter : la géométrie des anomalies constatées est bien souvent éloignée de celle des hétérogénéités. L'interprétation des résultats ne peut se faire que sur les profils inversés. Il faut cependant émettre des réserves sur la localisation des anomalies révélées en profondeur sur la coupe interprétée, car elles sont l'image d'hétérogénéités situées dans le demi-volume déli-

mité par la surface de la digue. Par ailleurs, la solution d'une anomalie mesurée n'est pas unique. Enfin, la profondeur d'investigation réelle est variable, ce dont ne rend pas compte la profondeur d'investigation interprétée. En revanche, cette coupe donne des indications précieuses sur les contacts entre couches et la géométrie de la digue, que les sondages géotechniques permettent ensuite de recaler en ordonnées absolues.

e) EXEMPLES DE RÉSULTATS

Le résultat suivant (figure 42) montre des mesures réalisées en panneau électrique sur un profil longitudinal d'une digue de l'Isère. L'interprétation brute montre que la digue est constituée de matériaux plus ou moins résistants. Après sondage, l'interprétation géologique peut commencer : les zones rouges et oranges correspondent à un remblai plutôt graveleux, de résistivité plus forte, dont on peut suivre la répartition le long de la digue. Les tons bleus correspondent à la base limono-argileuse de la digue. Les zones jaunes et vertes correspondent à des matériaux plutôt sableux. Sur le profil, à 36 m, une anomalie résistante apparaît plus nettement. L'échelle verticale indique la profondeur interprétée des anomalies : elle n'est qu'indicative. Seuls des sondages permettent d'obtenir les vraies profondeurs.

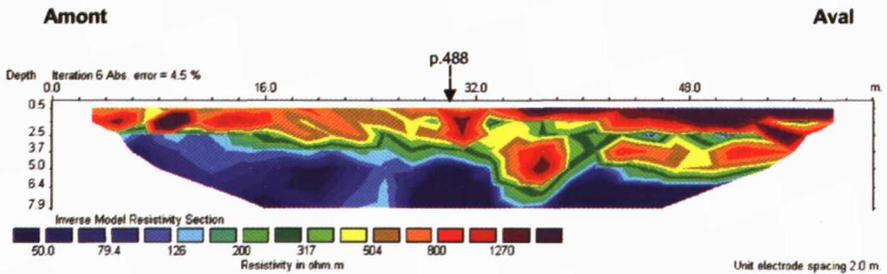


Figure 42 – Exemple de mesure en panneau électrique sur une portion de digue de l'Isère (Doc. IMS)

Un autre exemple de mesure en panneau électrique est donné sur la figure 4.3. Il s'agit d'un profil transversal, et reflète une géométrie classique d'un corps de digue ayant été intégré à une berge de rivière : le remblai, matériaux graveleux et plus résistants, en tons orange et rouge pour les plus grossiers, puis jaune et vert pour les plus fins, est peu épais côté val (champs) et s'épaissit côté rivière jusqu'à la risberme. L'assise de la digue, de matériaux plus compacts, limono-argileux, apparaît en tons bleus. La présence d'une anomalie résistante côté val, constatée sur plusieurs profils transversaux et parallèles, correspond à une conduite enterrée.

L'exemple suivant (figure 44) compare les résultats obtenus en panneau électrique et en méthode Slingram (EM31) sur la digue du Cher (figure 21). On notera que les échelles de résistivité ne sont pas logarithmiques. La zone moins résistante du panneau se retrouve bien sur le profil EM31 au-delà du point métrique (PM) 6290, et il en est de même pour la zone plus résistante qui la précède. L'image obtenue révèle

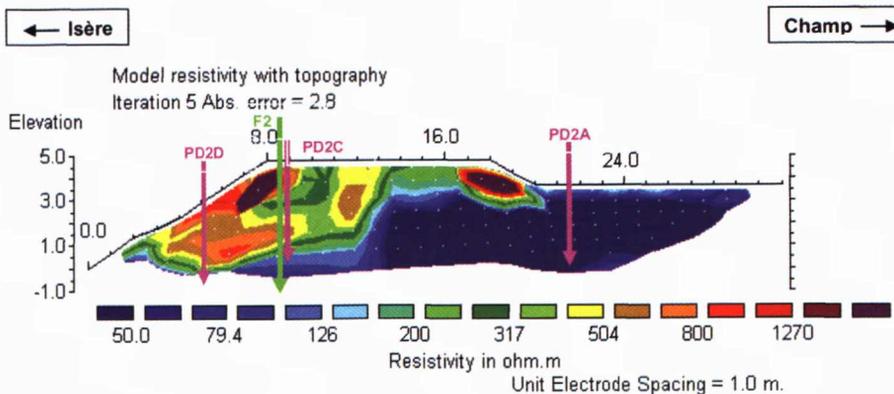


Figure 43 – Exemple de mesure en panneau électrique sur une digue de l'Isère. Le profil est transversal. (Doc. IMS)

une zone hétérogène de surface comprise entre le PM 6295 et le PM 6340, qui montre une portion conductrice sur les 5 premiers mètres environ, témoignant des travaux de réparation consécutifs à la brèche de 1856 et d'une mise en place de matériaux plus limoneux que les matériaux encaissants du remblai de la digue. Cette zone est au-dessus d'une couche plus résistante, à partir d'une dizaine de mètres, correspondant aux alluvions de sables grossiers et au substratum calcaire crayeux (figure 21).

Cet exemple illustre bien le compromis actuel entre les méthodes électromagnétiques basse fréquence et les méthodes électriques en courant continu de type panneau. La première est à grand rendement. Elle donne une valeur apparente de la résistivité d'un volume investigué en fonction de la position en surface. Sa mise en œuvre et son interprétation sont plutôt aisées. La seconde est une méthode à faible rendement (quelques centaines de mètres par jour). De même, elle donne la valeur apparente de la résistivité d'un volume d'investigation en fonction de la position en surface, mais aussi en fonction de la profondeur interprétée des hétérogénéités.

f) CONCLUSION

Le panneau électrique est une méthode efficace car elle permet une auscultation sur l'ensemble du corps de digue. Son rendement est faible (quelques dizaines de mètres par jour) car le déploiement du dispositif est long. Mais les mesures rendues sous forme de cartes de résistivité permettent de suivre la répartition de matériaux plus ou moins grossiers dans le corps de digue, en particulier d'obtenir un zonage entre matériaux constituant les recharges de digue, souvent résistants et correspondant à des matériaux grossiers (matériaux plus graveleux) et ceux constituant le corps, généralement plus fins (matériaux moins résistants et correspondant à des matériaux sableux et limono-argileux). La méthode permet, par ailleurs, de réaliser des profils transversaux révélant la géométrie grossière de la digue.

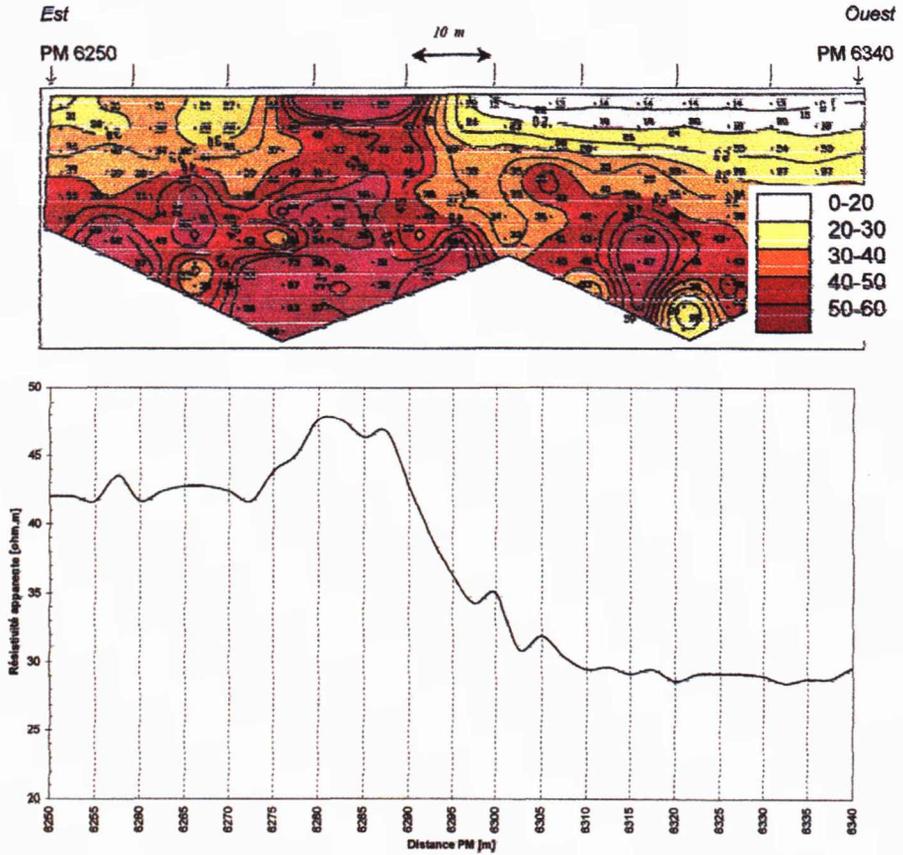


Figure 44 – Comparaison de mesures en panneau électrique et de mesures en méthode Slingram (EM31) (Frappin, 2001)

g) REMARQUE. RECONNAISSANCE À GRAND RENDEMENT ET À MOINDRE EFFICACITÉ :

LE PANNEAU ÉLECTRIQUE CAPACITIF

Le principe est présenté précédemment. C'est une méthode électrique ne nécessitant pas l'implantation d'électrodes dans le sol. Ces dispositifs possèdent un alignement de capteurs capacitifs traînés au sol. Ils offrent alors un rendement beaucoup plus grand puisqu'ils peuvent être traînés par un véhicule. Pour le dispositif testé, la profondeur d'investigation est faible (de l'ordre de 2 à 4 m suivant les matériaux). Elle dépend de l'écartement entre les électrodes et de la résistivité du sous-sol. Les conditions d'application restreignent leur utilisation à des surfaces planes et peu enherbées.

Un exemple de mesure est présenté sur la figure 45. Étant donné la faible profondeur d'investigation, ce dispositif renseigne surtout sur le remblai en crête de digue. Comme pour le panneau électrique, des réserves sont à émettre sur l'interprétation

des résultats, puisqu'il s'agit d'une représentation à deux dimensions de la répartition volumique (3D) des hétérogénéités. L'information recueillie est donc limitée. On voit cependant sur les profils B et C que sur les 20 premiers mètres, le remblai semble constitué en surface d'une succession de matériaux graveleux (plutôt résistants) et limoneux (conducteurs) et au-delà de l'abscisse 20 m, de matériaux plus résistants sur les 2,5 m de profondeur d'investigation estimée.

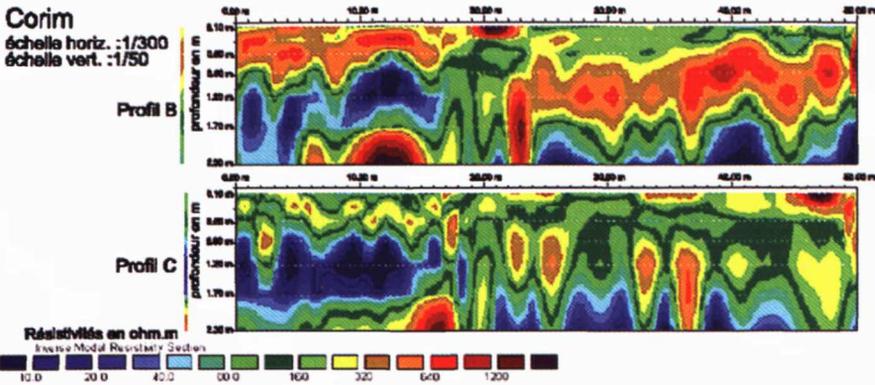


Figure 45 – Exemple de mesures réalisées avec un panneau électrique capacitif selon deux profils en crête de digue de l'Isère (Doc. IMS)

Le panneau électrique dit capacitif permet un rendement plus élevé pour des digues carrossables en crête, mais l'information recueillie, pour le dispositif testé, est limitée à la reconnaissance des matériaux de surface de la digue. Par ailleurs, les corrélations susceptibles d'être faites avec le panneau électrique n'ont pas montré de résultats satisfaisants. L'obtention de plus grandes profondeurs d'investigation, par exemple d'une dizaine de mètres, nécessiterait *a priori* des longueurs de dispositif de 60 à 80 m environ. L'encombrement de tels dispositifs restreindrait alors leur utilisation sur des profils rectilignes, ce qui n'est pas le cas des méthodes électromagnétiques basse fréquence.

4.6 Reconnaissance locale avec la sismique réfraction

4.6.1 Principe

Les méthodes de reconnaissance sismique en surface sont basées sur l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans le sol. Ces ondes sont provoquées en un point source par un choc (ou ébranlement) entre tenu ou non. Lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance mécanique, elles se réfléchissent partiellement vers un point récepteur où leurs caractéristiques sont mesurées et analysées pour étudier les propriétés du sous-sol (figure 46).

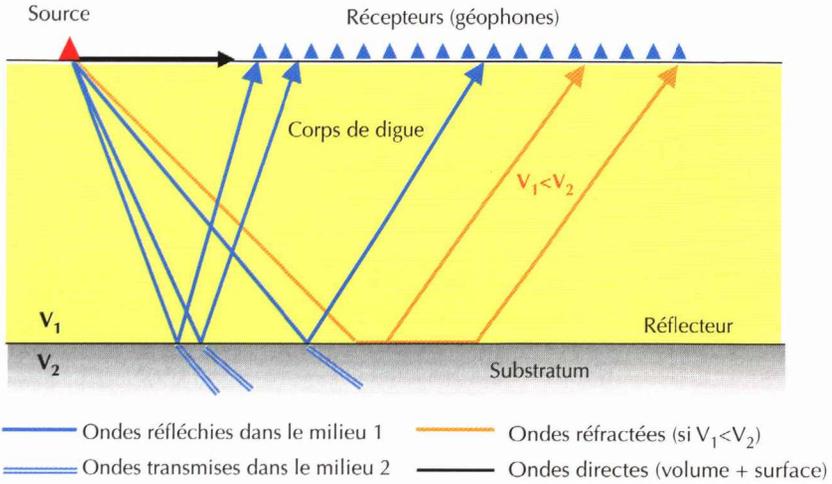


Figure 46 – Principe des méthodes sismiques

Les lois de propagation des ondes sismiques sont similaires aux lois de l'optique (lois de la réflexion et de la réfraction de Snell-Descartes, figure 47). Leurs trajets peuvent être très complexes. Leur temps de parcours dépend du trajet qu'elles empruntent.

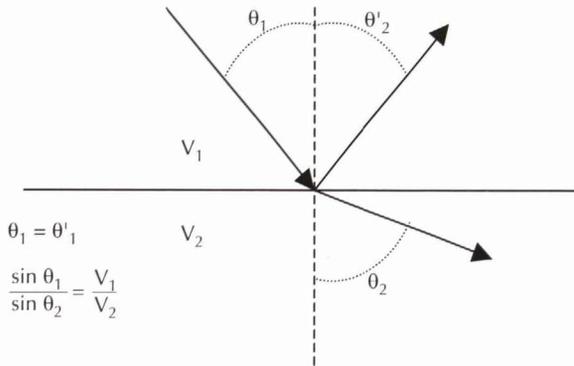


Figure 47 – Lois de Snell-Descartes

Pour le diagnostic des digues, trois méthodes sismiques sont envisageables :

- la sismique réflexion haute résolution (SHR) ;
- la sismique en onde de surface qui est une méthode en cours de développement ;
- la **sismique réfraction**, qui a déjà été appliquée pour le diagnostic de digue. C'est la méthode présentée ici.

La **sismique réfraction** est l'étude de la propagation des ondes sismiques réfractées dans le sol. Selon la figure 47, dans un milieu multicouche où le contraste des vitesses croît en fonction de la profondeur ($V_2 > V_1$), il existe un angle critique θ_c au-delà duquel les ondes sont réfractées : leur trajet suit l'interface entre couches et les ondes sont partiellement émises vers la surface suivant le même angle critique.

Cette méthode s'applique dans des milieux tabulaires, où le contraste des vitesses croît en fonction de la profondeur, ce qui est souvent le cas car la compaction augmente, en général, avec la profondeur. Elle est plus particulièrement utilisée dans le cadre du diagnostic des digues pour la recherche et le suivi de l'évolution de la position du substratum sous la fondation de la digue.

4.6.2 Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées sont présentées sous forme de **sismogrammes bruts**. Pour une position de la source sur le profil, ils représentent, en coordonnées verticales, les **amplitudes** et le **temps de propagation** (en secondes ou millisecondes) des ondes dans le sol et, en coordonnées horizontales, la **distance entre la source et les géophones**. Les amplitudes associées aux réfractions sont représentées en plan (sinusoïde, *wiggle* en anglais), quelquefois en niveau de couleurs. Généralement, seules les amplitudes des ondes de compression (onde P) sont exploitées.

4.6.3 Résultats attendus

Le **premier résultat** attendu est une **dromochronique** (figure 48b) qui est la représentation du temps de trajet des ondes réfractées en fonction de la distance entre la source et les géophones. Les dromochroniques sont établies à partir du pointé des temps de trajet des ondes réfractées sur le sismogramme brut. Le pointé des temps de trajet s'effectue à la base du signal (sinusoïde). La qualité de la mesure en sismique réfraction repose en grande partie sur l'attention portée au pointé. Les droites associées au pointé permettent de déterminer les vitesses des ondes sismiques dans le milieu tabulaire. Elle coupe, à l'origine des abscisses, l'axe des ordonnées en un point appelé intercept. Le **délai sismique** est par définition égal à la moitié de l'intercept. Dans le cas d'un milieu tabulaire à n couches, sans pendage, chaque **délai** peut être calculé par la formule :

$$D_n = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{e_i \cos \theta_{cin}}{V_i}$$

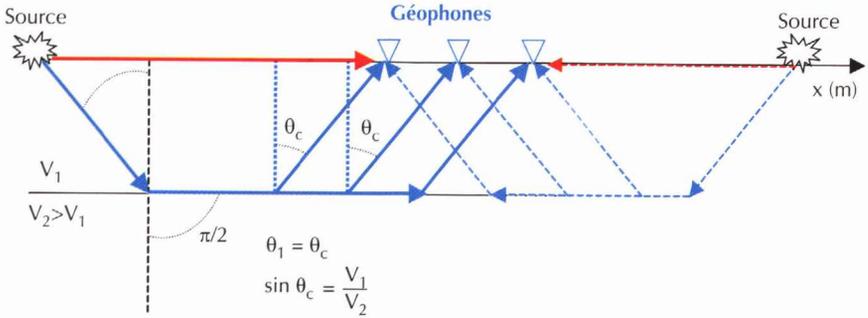
où e_i est l'épaisseur (m) de la couche i , θ_{cin} l'angle critique dans la couche i correspondant au trajet jusqu'à la couche n et V_i est la vitesse des ondes dans la couche i . La relation issue des lois de Snell-Descartes donne $V_i/V_n = \sin \theta_{cin}$.

À partir de cette formule, les épaisseurs au droit des géophones sont déterminées et le **second résultat attendu** est une représentation des horizons réfracteurs en fonction de la profondeur et de la position en surface.

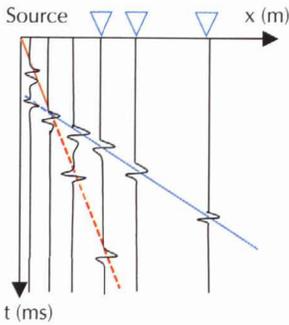
D'autres résultats comme l'interprétation des dromochroniques par la méthode du « plus-minus » peuvent être présentés. Cette méthode n'est pas décrite ici mais pourra être consultée par exemple dans l'ouvrage de Mari *et al.* (1998).

Cette méthode permet de suivre l'état de l'interface nette entre la fondation meuble de la digue et le *substratum*. Une zone plus ou moins homogène dans le corps de digue, ou la présence de zones décomprimées dans la fondation meuble, peut introduire un contraste de vitesse observable sur les dromochroniques et caractérisé par des **retards dans les temps d'arrivée** (surdélais) correspondant aux horizons réfracteurs. **Cette anomalie se retrouvera dans toutes les dromochroniques associées au dispositif**. On notera que le retard doit être significatif devant l'erreur de

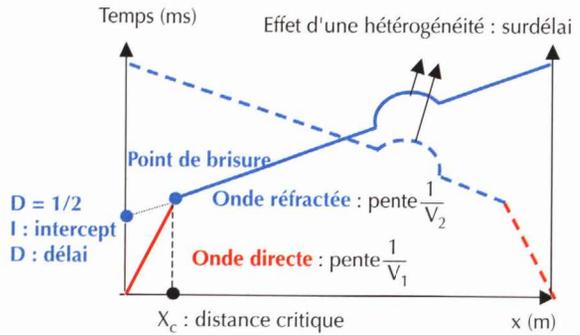
Principe



Sismogramme brut



Résultat attendu : dromochronique



Résultat attendu : coupe interprétée

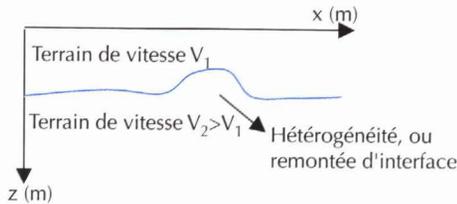


Figure 48 - a) Principe de la réfraction des ondes sismiques avec représentation des tirs en offset direct et inverse, b) représentation qualitative d'un sismogramme brut, c) dromochronique et d) coupe interprétée

mesure sur les temps de trajet, c'est-à-dire supérieure à environ 3 % du temps total d'enregistrement.

Par rapport aux méthodes décrites précédemment, l'intérêt réside dans la plus grande profondeur de pénétration, indispensable pour repérer le substratum situé souvent à des profondeurs supérieures à une dizaine de mètres par rapport à la crête de digue.

4.6.4 Méthodologie

Il faut vérifier l'hypothèse d'un profil de vitesse croissant entre couches en fonction de la profondeur. Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, la méthode n'est pas applicable. Une modélisation préalable est utile pour une aide à l'interprétation des signaux mesurés.

a) CHOIX DE L'ENREGISTREUR

Les enregistreurs sismiques ou sismographes permettent l'enregistrement des signaux sur un nombre de voies déterminé (classiquement de 24 à 96 voies, jusqu'à plusieurs centaines pour certains dispositifs). Les caractéristiques qu'ils doivent présenter sont les suivantes :

- pas d'échantillonnage d'environ 0,1 milliseconde ;
- amplificateur à virgule flottante et convertisseur analogique/numérique ;
- filtre 50 et 60 Hz ;
- possibilité de filtrage passe-bas, passe-haut et passe-bande ;
- possibilité d'additionner les tirs (*stacks*) ;
- possibilité de sauvegarde au format standard (SEG2).

b) CHOIX DE LA SOURCE SISMIQUE

La source doit être une source énergétique **haute fréquence** (fréquence dominante de l'ordre d'une **centaine de Hertz**) pour obtenir une bonne résolution. Dans l'idéal, elle doit être légère, maniable, répétitive et conforme aux règles de sécurité. Il existe de nombreuses sources, que l'on peut classer en deux types : les sources de surface et les sources enterrées (tableau 4).

Les sources sismiques enterrées fournissent davantage de hautes fréquences énergétiques, puisqu'elles sont en contact avec les roches plus profondes et mieux consolidées. À titre d'exemple, la figure 49 présente un tir réalisé sur le même site avec deux sources différentes. Les signaux émis par la source enterrée génèrent des plus hautes fréquences (la résolution temporelle est meilleure), sont moins bruités et sont plus énergétiques (réflexions entre 30 et 40 ms visibles avec une source enterrée alors qu'elles sont invisibles avec une source en surface) mais elles nécessitent un temps d'intervention plus long et un endommagement de la surface.

Le choix de la source haute fréquence dépendra donc des conditions de surface, de la profondeur de la nappe phréatique et de la profondeur des objectifs visés.

Source de surface	
Impact	Marteau, chute de poids
Projectile	Fusil à balle, betsy seisgun
Vibrateur	Minivib, minisosi
Source enterrée	
Explosif	Cordeau détonant, dynamite
Non-explosif	Fusil à cartouche, Sparker

Tableau 4 – Classement des sources sismiques haute résolution (Bitri *et al.*, 1996)

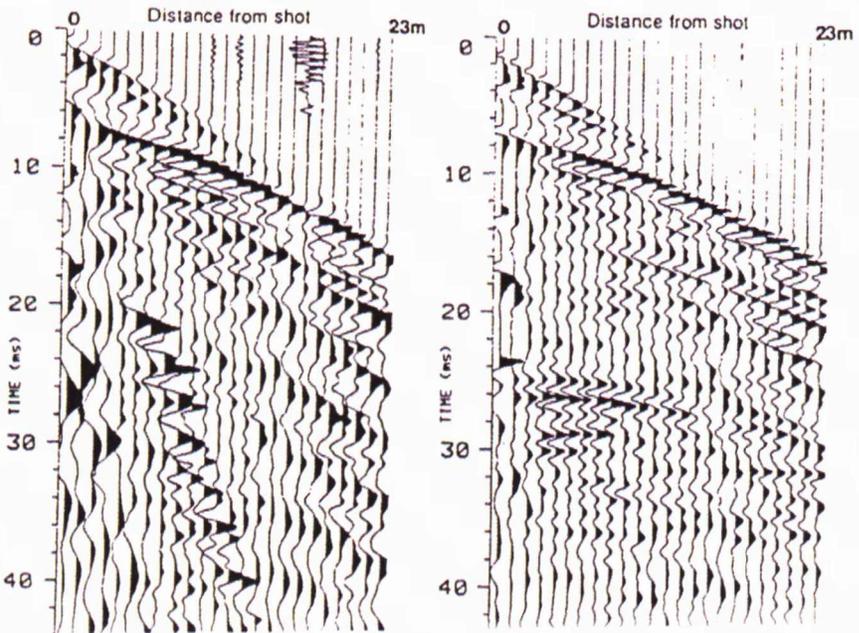


Figure 49 – Sources sismiques : à gauche, exemple de tir réalisé avec une source de surface (marteau). À droite, tir réalisé avec une source enterrée (cordeau détonateur) sur le même site (Braham et McDonald, 1992)

c) CHOIX DES RÉCEPTEURS SISMQUES : LES GÉOPHONES

Les géophones sont des détecteurs qui transforment l'énergie des ondes sismiques en énergie électrique. Ces géophones sont souvent mono-axiaux verticaux, car ce sont essentiellement l'enregistrement des ondes P qui ont un intérêt. Ils peuvent être tri-axiaux dans le cas où l'on désire dissocier les réponses des ondes P et des ondes S : ils mesurent alors les déformations dans les trois directions à la surface.

La réponse impulsionnelle d'un géophone présente un maximum à la fréquence dite dominante, qui est de l'ordre de 100 à 300 Hz pour la sismique haute résolution. La figure 50 montre le comportement d'un géophone 100 Hz en fonction de la fréquence. En dehors de la bande de fréquence indiquée par le constructeur, le bon fonctionnement du géophone n'est plus garanti. La bande passante se situe entre quelques Hertz et quelques centaines de Hertz. Suivant la cible recherchée et le type de mesure, la fréquence dominante des géophones peut être choisie comme suit (Bitri A. *et al.*, 1996) : elle doit au moins être égale à 10 % de la fréquence maximale que l'on espère enregistrer.

$$f_{\text{dominante}} \geq 0,1f_{\text{max}}$$

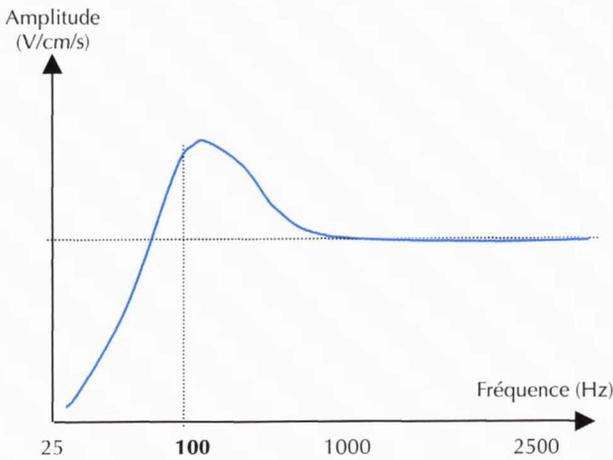


Figure 50 – Représentation qualitative de la réponse d'un géophone 100 Hz

d) CHOIX DE LA DIMENSION DU DISPOSITIF

Le nombre de voies classiquement disponibles sur les sismographes varie de 24 à 96. Un nombre de capteurs importants permet de minimiser les déplacements du dispositif, et ainsi d'assurer une meilleure stabilité dans les mesures. Le nombre de tirs dépend de la variabilité du sous-sol et de la précision souhaitée. Dans le cas de la figure 51, si le nombre n de capteurs est de 24, on effectue 5 tirs : 2 tirs en bout, 2 tirs en offset (ou tirs lointains) et un tir central. On peut ajouter des tirs intermédiaires entre les tirs en bout et le tir central selon les cas et en fonction du nombre de capteurs utilisés.

Si l'étude géologique, ou une première campagne de sondages, a permis de déterminer les premiers horizons réfracteurs, la longueur L du dispositif sera choisie telle que :

$$L \sim 2X_c$$

où X_c est la distance du point de brisure (figure 51). Dans ce cas, la distance séparant le tir offset (O ou P) avec le géophone le plus proche est de l'ordre d'une demi-fois la longueur du dispositif.

Si l'on ne dispose d'aucun renseignement sur le sous-sol, la longueur du dispositif est alors fixée selon l'expérience des utilisateurs. La profondeur d'investigation pourra alors être considérée dans une première approximation comme étant égale à $1/6^e$ de cette longueur. La distance séparant le tir d'offset avec le géophone le plus proche sera, dans ce cas, de l'ordre d'une fois la longueur du dispositif.

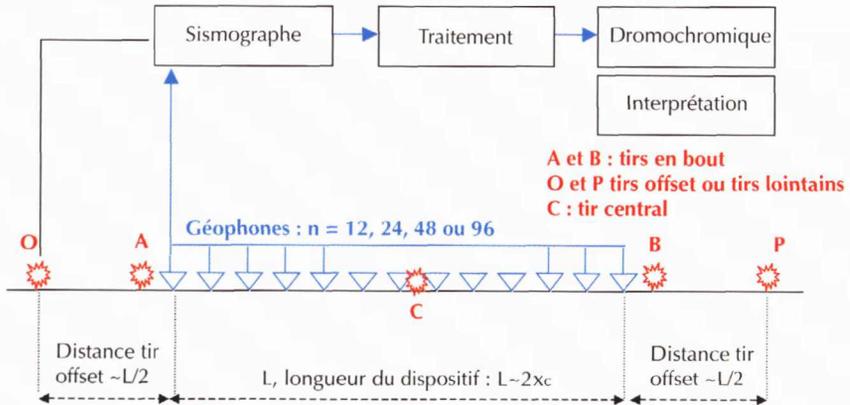


Figure 51 – Système d'acquisition en sismique réflexion

4.6.5 Exemple de mesure

L'exemple suivant est tiré de mesures géophysiques réalisées sur le canal du Centre (France) (Bièvre et Norgeot, 2004). Deux profils d'une centaine de mètres, réalisés avec un dispositif comportant 24 géophones séparés de 2 m sont représentés sur la figure 53. Ces profils ont deux géophones communs pour assurer un recouvrement des mesures. Les ébranlements sismiques sont réalisés à la masse. Les dromochroniques en trait noir montrent deux segments, dont la pente est inversement proportionnelle à la vitesse des ondes sismiques dans le milieu : un premier milieu de vitesse d'environ 500 m/s surmontant un *substratum* d'environ 4 000 m/s, qui correspondent respectivement (coupe de la figure 52) au corps de digue en terre et au substratum jurassique. Ces résultats bruts ont été inversés selon une méthode de recuit simulé, dont les données initiales sont les temps des premières arrivées des ondes sismiques, la position des sources et des géophones et les vitesses déterminées à partir des dromochroniques. Le résultat obtenu est une image représentant le milieu de vitesse en fonction de la profondeur. Le changement de milieu est indiqué par une variation rapide des vitesses sur l'image obtenue : le profil (en noir en bas de la figure 53) délimite l'interface entre le corps de digue et le substratum. On notera que les valeurs des vitesses données à ce niveau par l'inversion sont assez éloignées des valeurs de la transition réelle de 500 m.s⁻¹ à 4 000 m.s⁻¹. Le résultat reflète cependant bien la réalité du terrain (corrélation avec le sondage S3). Il indique en particulier une diminution de l'épaisseur du corps de digue en direction de l'est. La présence d'une

faille repérée sur la carte géologique et par les sondages est révélée aussi par la présence d'un palier sur le tir en offset (la dromochronique la plus à l'Est, en bleu, en haut de la figure 53).

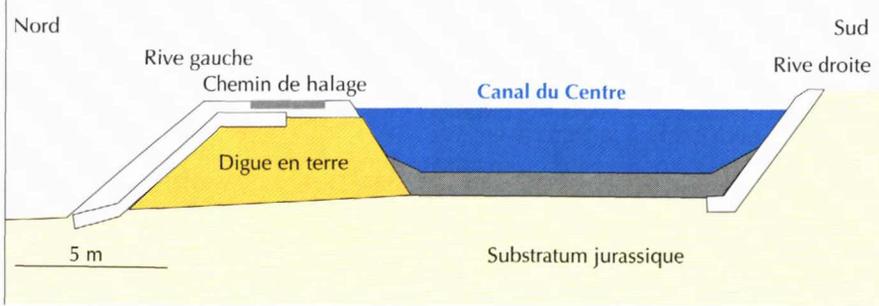


Figure 52 - Coupe du canal du Centre (Doc. CETMEF, d'après Bièvre et Norgeot (2004))

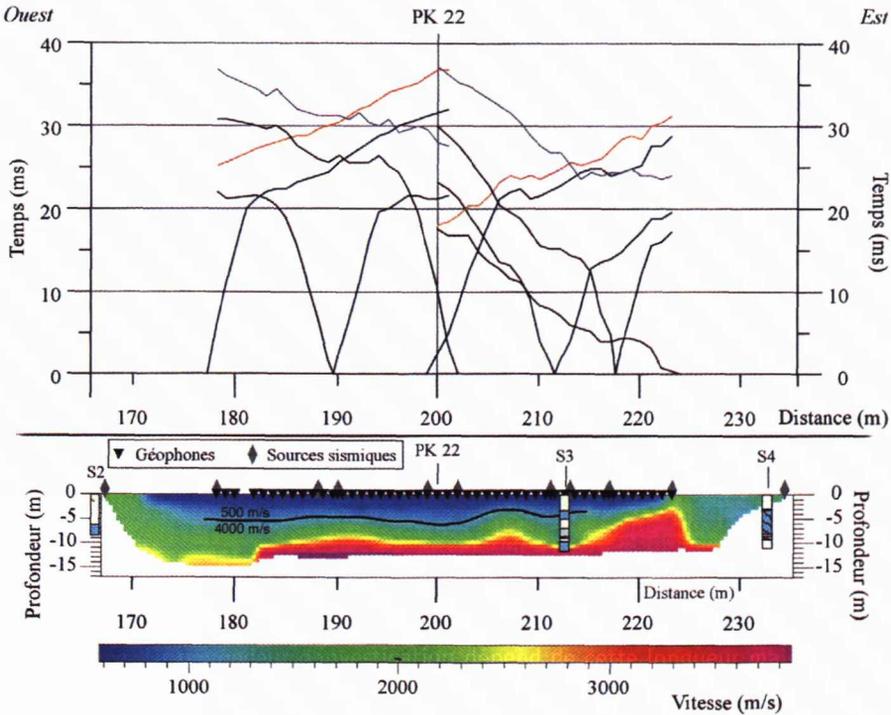


Figure 53 - Dromochroniques (en haut) et mesures inversées représentant les vitesses en fonction de la profondeur (Doc. CETMEF, d'après Bièvre et Norgeot (2004))

4.6.6 Conclusion

La sismique réfraction ne s'applique que pour des milieux tabulaires où le contraste des vitesses entre couches croît avec la profondeur. Elle permet de suivre l'état du contact entre la fondation meuble et le substratum. C'est une méthode de reconnaissance locale, dont le rendement est de l'ordre de quelques centaines de mètres par jour. Elle nécessite généralement deux opérateurs, dont un géophysicien expérimenté pour l'interprétation des mesures.

L'emploi de source explosive, le bruit environnant (sismique et électromagnétique) sont autant de contraintes qui restreignent l'utilisation de la méthode en milieu sécurisé.